

脱水污泥/生物质移动床混合热解-气化的协同效应

成 功¹, 焦 李², 段田莉¹

(1. 深圳市环境科学研究院, 深圳 518001; 2. 中航光电科技股份有限公司, 洛阳 471003)

摘 要: 以一定比例松木锯末、枯枝、落叶混合物作为生物质原料, 在自制的移动床气化炉上研究脱水污泥/生物质的混合热解-气化行为, 探讨不同掺混比(0%~100%)和炉温(800~900 °C)下热解-气化过程对产物分布、气体成分和热解-气化特性的协同效果。结果表明: 添加生物质能有效提高气体产率并减少液体产物的生成。混合热解-气化对气体产物具有明显的协同作用, 协同参数 V_{syn} 在掺混比为 50% 时最高, 并随炉温的升高而增大。气体产物组分同样受到 2 种原料共同作用的影响, 炉温为 800~900 °C 内, H_2 和 CO 含量的实验值比理论计算值分别高 10.75%~12.05% 和 6.35%~7.55%, CO_2 含量则偏低 7.55%~11.7%。在炉温 850 °C、生物质掺混比为 50% 的条件下, 脱水污泥/生物质混合热解-气化干气产率达到 0.56 Nm^3/kg , 气体热值 10.08 MJ/Nm^3 , 碳转化率 73.06%。

关键词: 脱水污泥; 生物质; 共热解; 移动床气化炉; 协同作用

中图分类号: X705

文献标识码: A

0 引 言

市政污泥热化学定向转化制备燃气和合成气是极具发展前景的污泥资源化利用技术^[1-3], 是在一定热力条件下, 在绝氧环境或借助于气化介质作用, 使污泥中有机组分发生热解、氧化、还原重整等热化学反应, 生成 CO 、 H_2 、 CO_2 和低分子烃类等合成气, 是化学能载体由固态转化为气态的过程^[4]。然而市政污水处理厂排放经压滤后的脱水污泥水分含量仍很高(含水率为 70%~80%), 且固体成分中包含较多灰分和较少挥发分^[5], 直接热解/气化时燃气产率通常不足 40%^[6]。现行较成熟的工艺多以干污泥为原料, 但污泥干化预处理会大大提高能耗和处理成本^[7,8], 上述问题成为阻碍该项技术应用推广的重要瓶颈之一^[9]。

脱水污泥与污泥相比, 生物质水分和灰分含量较低、挥发分和固定碳含量较高, 具有良好的气化反应活性, 被认为是更为优质的气化原料。采用脱水污泥与生物质混合进行热解/气化, 可调节原料含水率, 改善污泥的气化性能, 从而克服污泥单独利用存在的问题。金 溢等^[5]采用热重分析仪研究生物质与城市污水污泥共热解特性, 发现含纤维素和

木质素较多的松木屑与污泥共热解时有明显的协同作用发生。焦 李等^[10]的研究表明, 污泥与生物质混合共气化是提高产气效率及燃气品质的有效途径, 污泥中的水分能在高温环境下形成原位的水蒸气气氛, 并与热解产物继而发生蒸气重整反应, 从而提高燃气产量。

因污泥与生物质的热化学性质差异较大, 2 种原料对热转换温度的响应范围不尽相同^[11]。此外, 在混合热解-气化过程中掺混比例不同也会对混合物料的密度、热值和反应特性造成较大影响, 从而使热解-气化反应规律较污泥或生物质单独气化更复杂^[5]。目前, 有关不同工况条件下脱水污泥/生物质原位水蒸气热解-气化协同效应的研究较少。因此, 本研究在自制的移动床气化炉中考察掺混比和炉温对混合热解-气化过程产物分布、气体组成和热解-气化的协同作用, 以为该技术的工业化应用提供参考依据。

1 实 验

1.1 实验原料

实验所用的污泥取自武汉市某污水处理厂经

收稿日期: 2016-11-24

基金项目: 国家高科技研究发展(863)计划(2012AA101809)

通信作者: 成 功(1984—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事生物质能源利用技术方面的研究。chenggong021@163.com

机械脱水后的剩余污泥(含水率约为 80%),外观呈深褐色潮湿态饼块状。生物质原料取自武汉市某农业加工厂,包括松木锯末 92%、枯枝 6%、落叶 2%,样品自然晾晒干燥 7 d 后经破碎并过筛至

0.125~0.250 mm。实验中生物质按照 0%、30%、50%、70%、100%的掺混比充分混合,掺入生物质后的污泥变得松散、干燥,有利于污泥连续顺畅地进料至气化炉。样品的元素及工业分析见表 1。

表 1 样品元素及工业分析^a
Table 1 Ultimate and proximate analyzes of the samples^a

样品	工业分析/%				元素分析/%				
	水分 <i>M</i>	挥发分 <i>V</i>	固定碳 <i>FC</i>	灰分 <i>A</i>	[C]	[H]	[O] ^b	[N]	[S]
脱水污泥	76.0	3.7	3.8	16.5	4.36	0.60	1.93	0.56	<0.05
生物质	8.6	76.0	14.4	1.0	45.68	7.23	37.11	0.33	0.05

注:^a收到基;^b差减法。

1.2 实验装置

实验装置为自制的移动床气化炉(图 1),设计处理能力 1.2 kg/h,主要由两级螺旋进料器、气化室、电阻炉、温控装置、冷凝净化装置、气体分析仪等部分组成。气化室为水平放置的圆柱形钢管(Φ90 mm×1200 mm),有效加热长度为 600 mm,气化室一端底部接有排灰口(有效容积 4.5 L)。加热及温控装置由卧式电阻炉(武汉实验电炉厂,功率 4 kW)、K 型镍铬-镍硅热电偶及数显温度控制器组成。气体冷凝净化系统由水循环冷凝管及改性纤维球过滤管组成。实验开始前首先通入 N₂将反应装置中残余的空气吹扫排尽。然后将进料口填满原料形成料封。随后开启电阻炉及温控系统对气化炉加热,控制升温速率为 20 ℃/min,实验中设定气化温度范围为 800~900 ℃,待炉膛温度达到设定值并保持稳定后开启螺旋进料器。整个过程中反

应器内始终维持微正压。反应产生的气体产物经冷凝管,其中可冷凝的大分子有机物和水蒸汽被冷凝,并收集在焦油收集瓶中。不可冷凝的永久性气体经净化器的干燥和除尘后用集气袋取样收集,以供后续成分分析。固体残余物则随螺旋给料器的转动落入排灰斗中收集。实验结束后,收集瓶中液体的质量即为液态产物产量,主要包括部分水分、生物油和一些细小焦炭颗粒。排灰斗中收集残余物的质量为固体产物的产量。气体产物的产量通过气体体积产量及其密度计算得出。每次实验平行 2 次取平均值。

1.3 分析方法

样品的工业分析参考《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008),元素分析采用 CHNS/O 分析仪(Vario Micro cube,Elementar),其中 O 元素含量由差减法计算。气体产物中的主要成分 H₂、N₂、CO、CO₂ 和 CH₄采用 GC9800T 型气相色谱仪(上海科创色谱仪器有限公司)测定,色谱柱为不锈钢柱 Φ3 mm×2 m(5 A,porapakQ 和 TDX-01 色谱柱)。测试过程中气化柱、柱箱和检测器温度分别为 200、85 和 90 ℃。高纯度氩气(99.999%)作载气,载气流量为 40 mL/min。

1.4 计算方法

1)干气产率(G_y ,Nm³/kg),指单位质量样品气化后得到的干燥气体产物在标准状态下的体积,计算公式如式(1)所示:

$$G_y = \frac{V_g}{M}$$

(1)

式中, V_g ——气体产物流量,Nm³/h; M ——原料进

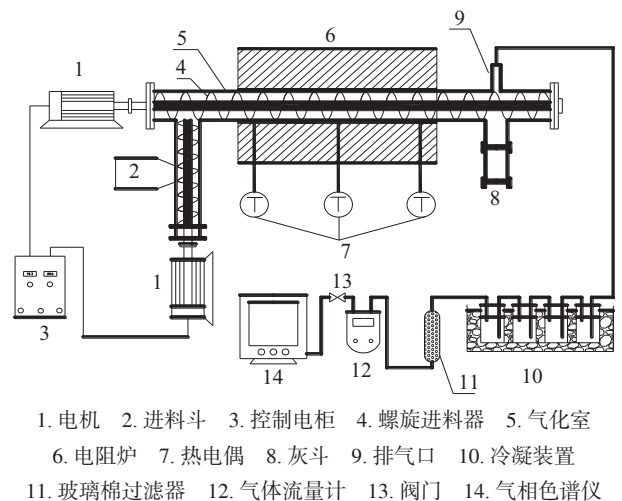


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental apparatus

料速率, kg/h。

2) H_2 产率 (Y_{H_2} , mol/kg), 单位质量样品反应得到的 H_2 的产量, 计算公式为:

$$Y_{H_2} = \frac{1000G_Y}{22.4} \times \varphi_{H_2} \quad (2)$$

3) 气体产物的低位热值 (LHV) 采用式(3)进行估算:

$$LHV = 126.36 \times \varphi_{CO} + 107.98 \times \varphi_{H_2} + 358.18 \times \varphi_{CH_4} + 590.36 \times \varphi_{C_2H_4} + 637.72 \times \varphi_{C_2H_6} \quad (3)$$

4) 碳转化率 $\eta_c\%$ 是指气体产物中碳含量与固体原料中碳含量的比值, 计算公式为:

$$\eta_c = 12G_Y \times \frac{\varphi_{CO} + \varphi_{CO_2} + \varphi_{CH_4} + 2 \times (\varphi_{C_2H_4} + \varphi_{C_2H_6})}{22.4 \times C} \times 100\% \quad (4)$$

式中, φ_{CO} 、 φ_{H_2} 、 φ_{CO_2} 、 φ_{CH_4} 、 $\varphi_{C_2H_4}$ 、 $\varphi_{C_2H_6}$ ——气体产物中 CO 、 H_2 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6 的体积分数, %; C ——固体样品原料中碳元素含量, %。

5) 混合热解-气化过程中协同效应使共气化参数的实际值与单独气化参数的线性叠加值有所差别, 即存在一定的非线性变化规律, 用式(5)表征协同效应对参数的影响^[12]:

$$V_{syn} = V_t - (aV_{biomass} + bV_{sludge}) / (a + b) \quad (5)$$

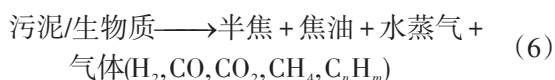
式中, V_{syn} ——表征协同效应影响的参数; V_t ——混合热解-气化过程中的实际参数值; $V_{biomass}$ 、 V_{sludge} ——生物质和污泥气化时的参数值; a 、 b ——生物质和污泥的掺混比。

2 结果和讨论

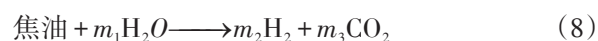
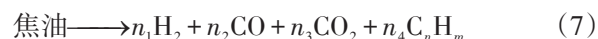
2.1 脱水污泥/生物质混合热解-气化过程

脱水污泥/生物质在移动床气化炉的混合热解-气化过程包括干燥、热解、焦油二次转化及水蒸气重整等一系列反应。混合物料给入气化炉后被快速加热, 污泥中的水分迅速转化为高温水蒸气。随着有机挥发组分的释放和残余半焦的生成, 气体产物以及半焦中的碳继而与水蒸气发生气-气、气-固的气化反应。共气化过程潜在的反应如下^[13-15]:

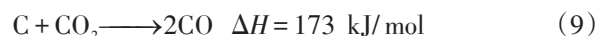
初级热解:



焦油二次裂解及重整:



布多尔反应:



水煤气反应:



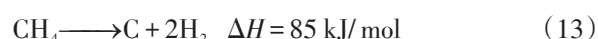
水气转换反应:



甲烷水蒸气重整反应:



此外, 较高的温度也会引起有机气体的裂解:



2.2 混合热解-气化对产物分布的影响

脱水污泥/生物质混合热解-气化对产物分布的影响如图2所示。单独的生物质或脱水污泥裂解产物产率差别较大, 这与二者化学组分相关。生物质主要由纤维素、半纤维素及木质素组成, 纤维素、半纤维素热解时分子结构中的葡萄糖单元断裂形成大量挥发性气体及少量可冷凝的焦油和水分, 木质素则较难分解, 最终形成固体半焦^[16]。污泥成分较为复杂, 包括水分、脂类和蛋白质类物质、微生物残体和无机盐等^[17]。其中的有机物分解形成气体产物, 热稳定性的灰分形成固体残余物, 而几乎全部的水分经过蒸发、冷凝后又重新进入液体产物中, 故产物以水分和焦油的混合物为主。

当炉温为 800~900 °C 时, 生物质掺混比的增大使气体产率从 9.3%~10.7% 快速增至 70.1%~75.6%, 液体产率(水分+焦油)则由 80.1%~81.9% 急剧减至 5.7%~7.3%。而半焦的产率相对较低, 由 5.7%~6.6% 逐渐增至 16.2%~18.9%。一方面生物质的添加使原本潮湿、粘稠的污泥更加蓬松、分散, 有利于螺旋给料器的输送, 并减少了反应过程中物料的板结, 从而使气化反应进行得更加充分; 另一方面说明生物质影响物料的基本组成对气化效果的改善作用明显。炉温对产物产率的影响同样显著, 在生物质掺混比为 50% 时, 燃气产率从 51.1% 增至 57.2%, 而半焦和液体产物的产率则分别由 12.6% 和 31.4% 逐渐降至 6.3% 和 27.1%。

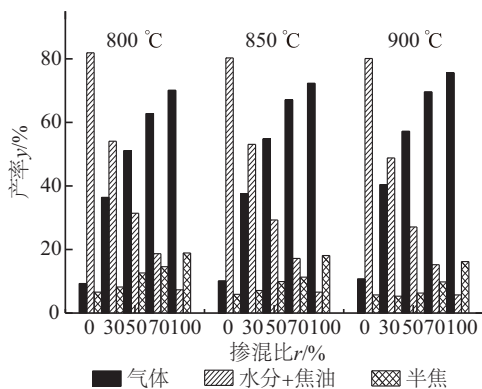


图2 混合热解-气化过程的产物分布

Fig. 2 Product distribution of pyrolysis-gasification

值得注意的是,脱水污泥和生物质混合热解-气化并非两种物料单独反应贡献的简单叠加。表2列出了不同条件下混合热解-气化产物产率的实验值与理论计算值之间的协同参数(V_{syn} 值),其在一定程度上反映出混合热解-气化过程中各反应相互影响的关系。不难看出,当掺混比达到50%,混合热解-气化协同效果明显加强,对气体产物存在积极的促进作用($V_{\text{syn}} > 0$),同时抑制了液体产物的生成($V_{\text{syn}} < 0$)。

表2 混合热解-气化产物产率的协同参数

Table 2 Synergistic parameters of product yields

温度 <i>T</i> /°C	掺混比 <i>r</i> /%	V_{syn}		
		气体产物	焦油	半焦
800	30	8.86	-5.42	-2.09
	50	11.40	-13.20	-0.15
	70	10.94	-10.98	-0.61
850	30	8.84	-5.09	-2.46
	50	13.60	-14.15	-2.10
	70	13.46	-11.51	-3.14
900	30	10.23	-8.98	-3.55
	50	14.05	-15.80	-4.65
	70	13.47	-12.82	-3.25

相比之下,半焦产率的 V_{syn} 值则显得微乎其微,预示液-气两相反应的此消彼长是增大气体产率的主要因素。据此推测,混合热解-气化过程中由污泥水分形成的高温水蒸气经历2种反应途径:一部分经冷凝后变成液态水进入液相;另一部分与同时生成的热解中间产物发生二次气化及蒸汽重整反应。生物质的添加提高了混合物料中挥发分含量,裂解生成了更多的中间相焦油气,经反应(式(8))

转换为轻质气体,同时消耗水蒸气,因此生成额外气体产物。此外,协同效应随炉温的升高而更加明显。一方面,炉温升高使物料中挥发分析出更彻底,所产生的大分子碳氢化合物(焦油气)在高温下的二次裂解加剧,形成更多小分子气体,从而气体产率明显提高,而液体产率相应降低;另一方面,碳与水蒸气和 CO_2 的气化反应(式(9)、式(10))均为吸热反应,高温有利于这些反应朝正向进行,因此半焦中的部分固定碳通过布多尔、水煤气反应转化为气体产物。

2.3 混合热解-气化对气体组分的影响

脱水污泥/生物质混合热解-气化对气体组分的影响如图3所示。尽管脱水污泥和生物质化学组成差异明显、产气效率不尽相同,但单独反应时所得气体产物的主要成分较为接近,主要包含 H_2 、 CO 和 CO_2 等小分子燃气及少量 CH_4 、 C_2 等低分子烃类。随着生物质的掺入, H_2 和 CO 呈一致的变化规律,其含量经历先升高后降低的过程,在掺混比为50%时达到最高。而 CO_2 及 CH_4 、 C_2 等烃类含量则表现出截然相反的趋势。考虑到脱水污泥气体产率极低,对混合热解-气化气体组成的决定作用理应较小,但并未观察到气体含量与生物质掺混量间的线性关系, H_2 、 CO 和 CO_2 均在50%掺混量时出现“拐点”,表明共气化气体组分实际受到2种原料共同作用的影响。

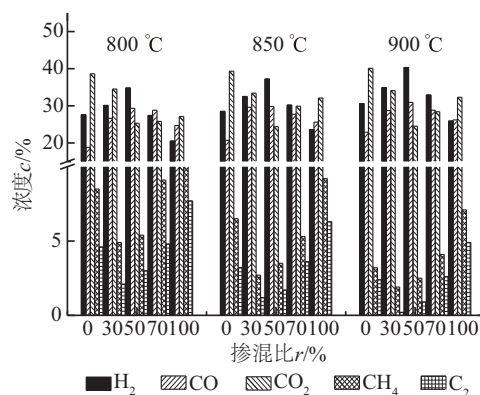


图3 混合热解-气化产物的气体组分

Fig. 3 Gas composition of pyrolysis-gasification

由表3可知,掺入生物质对于 H_2 和 CO 产生积极的协同作用,二者含量均明显高于理论计算值;对于其他气体的影响则体现为消极效果,与理论计算值比偏低。而这种影响在掺混比为50%时最为

显著,此时 H_2 和 CO 的含量分别高 10.75%~12.05% 和 6.35%~7.55%, CO_2 含量对应的偏低 7.55%~11.7%。实验结果进一步证明,利用生物质调节混合物料中水分和碳含量的比值能影响一系列复杂裂解、气化反应的历程。当掺混比从 0%增至 50%,物料中有更多的挥发分和固定碳参与到水蒸气气化反应中,水煤气和重整反应(式(8)、式(10)~式(12))开始剧烈发生,故 H_2 含量增大。物料含水率的减小则引发气化炉中高温蒸汽减少,布多尔反应逐渐取代水气置换反应占据主导地位,加快了 CO_2 向 CO 的转换。当掺混比进一步增大,水蒸气的供应量降至无法支撑气化反应大量发生时, H_2 和 CO 含量减小, CO_2 含量则缓慢增大,气体组分开始回归到由生物质的初级热解反应所决定的阶段。

表3 不同条件下产物产率的协同参数

Table 3 Synergistic parameters of gas components at different conditions

温度 $T/^\circ C$	掺混 比 $r/\%$	V_{syn}				
		H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2
800	30	4.63	6.03	-0.65	-5.07	-3.43
	50	10.75	7.55	-7.55	-5.35	-3.15
	70	4.77	5.87	-4.75	-2.83	-1.97
850	30	5.47	7.43	-3.74	-4.61	-2.93
	50	11.15	6.65	-11.30	-4.35	-3.05
	70	5.13	3.57	-4.36	-3.09	-1.77
900	30	5.71	4.81	-3.66	-2.47	-2.95
	50	12.05	6.35	-11.70	-2.65	-2.75
	70	5.59	3.59	-6.24	-1.83	-1.55

随着炉温升高燃气中 H_2 含量逐渐增大。混合热解-气化过程 H_2 的产生主要来自 2 个方面^[18]: 1) 物料中有机物分子缩聚脱氢反应生成相应的烯烃和 H_2 ; 2) 二次裂解或水蒸气气化反应。由于初始热解及气化反应大多以吸热反应为主,故提高炉温有利于反应向生成 H_2 的方向进行。 CO 和 CO_2 则呈截然相反的变化趋势,随着炉温从 800 $^\circ C$ 升至 900 $^\circ C$, CO 含量增大而 CO_2 含量相应减少。尽管燃气中碳氧化物主要来源于有机物的脱羰基反应,但 CO 和 CO_2 含量却由一系列复杂的气化反应决定。结果表明,在较高炉温下,布多尔反应(式(9))和水煤气反应(式(10))等吸热反应在整个气化过程中逐渐占据主导作用。对于 CH_4 而言,逐步提高的炉

温导致其含量大幅减小。这是因为 CH_4 主要产生于反应初期挥发分析出阶段发生的脂肪烃类物质自由基裂解、芳香族侧链断裂、醚键断裂等过程^[19],而在更高温度下, CH_4 的裂解(式(13))及重整(式(12))等吸热反应表现得更为显著,以至于加剧了 CH_4 的消耗。燃气中 C_2H_2 、 C_2H_4 和 C_2H_6 等小分子烃类气体(C_2)含量则相对较低,其形成的机制主要为污泥和生物质原料中脂肪族化合物、蛋白质、纤维素和木质素等长链碳氢化合物的高温裂解。炉温的升高加剧了小分子烃的二次裂解(式(14)、式(15)),从而导致其含量平缓减小。

2.4 混合热解-气化特性参数

不同反应条件下混合热解-气化特性参数如表 4 所示。正如所预期的,污泥/生物质在移动床的混合热解-气化过程中干气产率和碳转化率均随炉温的升高而增大,这与气体产物和 H_2 含量的增大合理对应。值得注意的是,产品气的热值随之略微降低。一般而言,产品气的热值主要取决于甲烷及碳氢化合物的浓度,水蒸气重整反应的进行导致 CH_4 、 C_2H_4 和 C_2H_6 含量减小,从而造成了燃气热值的变化。随着生物质掺混比从 0%增至 100%,碳转化率从 72.86%~79.30%降至 57.50%~58.11%,这主要是由于生物质中固定碳含量较高,混合热解-气化过程中难以完全转化。而燃气热值却相应增大,干燥基的燃气热值由 H_2 、 CO 、 CH_4 和 C_2 等可燃性气体组分决定,虽然 H_2 、 CO 在气体组分中含量更高,但是 CH_4 、

表4 不同条件下的混合热解-气化特性参数

Table 4 Pyrolysis-gasification performance at different conditions

参数	温度 $T/^\circ C$	掺混比 $r/\%$				
		0	30	50	70	100
$G_v/$ $Nm^3 \cdot kg^{-1}$	800	0.080	0.32	0.51	0.58	0.61
	850	0.086	0.34	0.56	0.61	0.62
	900	0.092	0.37	0.60	0.66	0.66
$LHV/$ $MJ \cdot Nm^{-3}$	800	11.22	9.65	11.23	12.80	14.86
	850	9.98	8.95	10.08	10.87	12.95
	900	8.82	8.20	9.70	10.26	11.66
$\eta_c/\%$	800	72.86	72.45	71.85	68.65	57.50
	850	76.65	74.41	73.06	69.31	57.89
	900	79.30	77.83	77.25	70.54	58.11

C₂等小分子烃对热值的贡献要大得多。即使燃气中 H₂、CO 含量在掺混比高于 50%后显著降低,但 CH₄ 和 C₂ 含量的增加导致燃气热值增加。可看出,单独的污泥气化碳转化率虽可达到 70%以上,但干气产率仅不足 0.1 Nm³/kg,这对于实际工艺应用仍存在气化效率偏低的问题。混合热解-气化的方式在有效改善了干气产率的基础上,同时保证了较高的燃气热值和碳转化率,考虑到对脱水污泥的处理能力,建议采用 50%的生物质掺混比。

3 结 论

脱水污泥/生物质混合热解-气化存在明显的协同作用。对气体产物存在积极的促进作用,同时抑制了液体产物的生成,而对半焦产率的影响则较小。当掺混比达到 50%时协同效果最强,且随着炉温的升高协同参数 V_{syn} 值逐渐增大。所得气体的组分同时受到 2 种原料共同作用的影响,掺入生物质对于 H₂ 和 CO 产生了积极的协同作用,对于其他气体的影响则体现为消极的效果。采用脱水污泥/生物质混合热解-气化的方式有效解决了单独污泥气化产气效率偏低的问题,同时取得了较高的燃气热值和碳转化率,对于实际工艺应用具有一定的指导意义。

[参考文献]

- [1] Chun Young Nam, Kim Seong Cheon, Yoshikawa Kunio, et al. Pyrolysis gasification of dried sewage sludge in a combined screw and rotary kiln gasifier[J]. *Apply Energy*, 2011, 88(4): 1105—1112.
- [2] 王晓磊, 邓文义, 于伟超, 等. 污泥微波高温热解条件下富氢气体生成特性研究[J]. *燃料化学学报*, 2013, 41(2): 243—251.
- [2] Wang Xiaolei, Deng Wenyi, Yu Weichao, et al. Hydrogen-rich gas formation characteristics during microwave-induced high temperature pyrolysis of sewage sludge[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, 41(2): 243—251.
- [3] 熊思江, 章北平, 玉东科, 等. 干燥污泥与含水污泥的热解动力学研究[J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2011, 39(2): 124—128.
- [3] Xiong Sijiang, Zhang Beiping, Yu Dongke, et al. Study on pyrolysis kinetics of dried and wet sewage sludge[J]. *Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2011, 39(2): 124—128.
- [4] Samolad M C, Zabaniotou A A. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece[J]. *Waste Management*, 2014, 34(2): 411—420.
- [5] 金 溢, 李宝霞. 生物质与污水污泥共热解特性研究[J]. *可再生能源*, 2014, 32(2): 234—238.
- [5] Jin Pen, Li Baoxia. The study of co-pyrolysis characteristics of the biomass and sewage sludge[J]. *Renewable Energy Resources*, 2014, 32(2): 234—238.
- [6] Zhang Beiping, Xiong Sijiang, Xiao Bo, et al. Mechanism of wet sewage sludge pyrolysis in a tubular furnace[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(1): 355—363.
- [7] Nipattummakul N, Ahmed I, Kerdsuwan S, et al. Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification[J]. *Fuel & Energy Abstracts*, 2010, 35(21): 11738—11745.
- [8] De Andrés J M, Narros A, Rodríguez M E, et al. Behaviour of dolomite, olivine and alumina as primary catalysts in air-steam gasification of sewage sludge[J]. *Fuel*, 2011, 90(2): 521—527.
- [9] Nipattummakul N, Ahmed I, Kerdsuwan S, et al. High temperature steam gasification of wastewater sludge[J]. *Apply Energy*, 2010, 87(12): 3729—3734.
- [10] 焦 李, 蔡海燕, 何丕文, 等. 脱水污泥/松木锯末水蒸气共气化研究[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(4): 1098—1103.
- [10] Jiao Li, Cai Haiyan, He Piwen, et al. Steam co-gasification of dewatered sewage sludge and pine sawdust[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(4): 1098—1103.
- [11] 张双全, 武 娜, 董明建, 等. 城市污泥与玉米秸秆共热解制备吸附剂的研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2011, 40(5): 799—803.
- [11] Zhang Shuangquan, Wu Na, Dong Mingjian, et al. Research on preparation of adsorbents by co-pyrolysis of sewage sludge with corn straw[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2011, 40(5): 799—803.
- [12] 王建飞, 赵建涛, 李凤海, 等. 烟煤与生物质快速共热解产物特性分析[J]. *燃料化学学报*, 2015, 43(6): 641—648.
- [12] Wang Jianfei, Zhao Jiantao, Li Fenghai, et al. Product characteristics for fast co-pyrolysis of bituminous coal

- and biomass [J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2015, 43(6): 641—648.
- [13] Lyu Pengmei, Yuan Zhenhong, Ma Longlong, et al. Hydrogen-rich gas production from biomass air and oxygen/steam gasification in a downdraft gasifier [J]. *Renewable Energy*, 2007, 32(13): 2173—2185.
- [14] Lyu Pengmei, Xiong Zuhong, Chang Jie, et al. An experimental study on biomass air-steam gasification in a fluidized bed [J]. *Bioresource Technology*, 2004, 95: 95—101.
- [15] Mastellone M L, Zaccariello L, Arena U, et al. Co-gasification of coal, plastic waste and wood in a bubbling fluidized bed reactor [J]. *Fuel*, 2010, 89 (10): 2991—3000.
- [16] Burton A, Wu Hongwei. Diagnosis of bed agglomeration during biomass pyrolysis in fluidized-bed at a wide range of temperatures [J]. *Fuel*, 2016, 179: 103—107.
- [17] 熊思江, 章北平, 冯振鹏, 等. 湿污泥热解制取富氢燃气影响因素研究 [J]. *环境科学学报*, 2010, 30(5): 996—1001.
- [17] Xiong Sijiang, Zhang Beiping, Feng Zhenpeng, et al. The effect of experimental conditions on wet sludge pyrolysis for hydrogen-rich fuel gas [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(5): 996—1001.
- [18] Couto N D, Silva V B, Rouboa A. Assessment on steam gasification of municipal solid waste against biomass substrates [J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 124: 92—103.
- [19] Luo Siyi, Feng Yu. The production of hydrogen-rich gas by wet sludge pyrolysis using waste heat from blast-furnace slag [J]. *Energy*, 2016, 113: 845—851.

SYNERGISTIC EFFECT ON PYROLYSIS-GASIFICATION OF DEWATERED SEWAGE SLUDGE AND BIOMASS IN A MOVING BED GASIFIER

Cheng Gong¹, Jiao Li², Duan Tianli¹

(1. *Shenzhen Academy of Environmental Sciences, Shenzhen 518001, China*;

2. *China Airiation Optical-Electrical Technology Co., Ltd., Luoyang 471003, China*)

Abstract: Pyrolysis-gasification behavior of dewatered sewage sludge and biomass was studied in a lab-scale moving bed gasifier. The biomass feedstock is the mixture of pine sawdust and litter according to a certain proportion. Synergistic effects on products distribution, gas composition and gasification performance were investigated at biomass blend ratio from 0 to 100% and gasifier temperature from 800 °C to 900 °C. The results showed that biomass blend can increase gas yield and the decrease liquid yield. A positive synergistic effect on gas yield is found in the pyrolysis-gasification process. The V_{syn} value can reach the maximum at 50% biomass blend ratio, increasing with the increase of gasifier temperature. Composition of fuel gas from the pyrolysis-gasification is also affected by blending of the two feedstock. The experimental values of H_2 and CO concentrations are higher than the calculated values by 10.75%-12.05% and 6.35%-7.55%, respectively. However, CO_2 concentrations are 7.55%-11.7% lower than the calculated values. At 850 °C gasifier temperature and 50% biomass blend ratio, the dry gas yield, heating value of the gas and carbon conversion efficiency are respectively 0.56 Nm^3/kg , 10.08 MJ/Nm^3 and 73.06%.

Keywords: dewatered sewage sludge; biomass; co-pyrolysis; moving bed gasifier; synergistic effect