

熊思江, 章北平, 冯振鹏, 等. 2010 湿污泥热解制取富氢燃气影响因素研究[J]. 环境科学学报, 30(5): 996-1001

Xiong S J, Zhang B P, Feng Z P, *et al*. 2010. The effect of experimental conditions on wet sludge pyrolysis for hydrogen-rich fuel gas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 30(5): 996-1001

湿污泥热解制取富氢燃气影响因素研究

熊思江¹, 章北平^{1*}, 冯振鹏¹, 肖波¹, 夏睿勤²

1 华中科技大学环境学院, 武汉 430074

2 温岭市政工程建设管理处, 温岭 317500

收稿日期: 2009-08-14 修回日期: 2009-11-18 录用日期: 2010-02-01

摘要: 采用管式炉热解装置, 在 700~1000°C 温度范围内对不同含水率的生物污泥进行中高温常压热解实验, 研究了加热模式、热解终温、物料含水率及升温速率对热解产物产率及气相产物组成的影响规律。结果表明: 待温度达到设定温度后, 迅速将物料送入反应区的加热模式有利于得到高品质燃气; 高温能减少固体碳和焦油的生成, 促进富氢气体产生; 同时, 随着物料含水率的增加, 氢气体积分数从 17% 提高到 36%, 当含水率为 84% 时, H₂ + CO 的含量 (体积分数) 达到最大值; 提高热解升温速率能使气相产物产率得到相应增加。湿污泥在高温条件下进行的快速热解过程, 一次性完成了污泥干燥、热解和气化, 更有利于氢气组分和其他可燃气体的生成, 所得气体热值高达 12 MJ m⁻³ 以上。

关键词: 湿污泥; 热解; 气化; 富氢燃气; 热值

文章编号: 0253-2468(2010)05-996-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

The effect of experimental conditions on wet sludge pyrolysis for hydrogen-rich fuel gas

XIONG Sijiang¹, ZHANG Beiping^{1*}, FENG Zhenpeng¹, XIAO Bo¹, XIA Ruqin²

1 School of Environmental Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074

2 Department of Municipal Engineering Construction Management Wenling 317500

Received 14 August 2009; received in revised form 18 November 2009; accepted 1 February 2010

Abstract Pyrolysis experiments for sewage sludge with different moisture contents were performed at temperatures of 700~1000°C and at atmospheric pressure in a tubular furnace. Pyrolysis conditions such as heating mode, final pyrolysis temperature, moisture content and heating rate were analyzed to determine how they affect the characteristics of the resulting gas, liquid and solid residue. The results indicated that high quality flammable gas could be obtained when sludge was sent into the reactor at the settling temperature; the yields of solid and liquid could be reduced at a high temperature which favored the production of hydrogen-rich gases. The H₂ content of the gas product rose from 17% to 36% as the moisture content of sewage sludge increased and H₂ + CO content reached the highest level at a moisture content of 84%; in addition, the gas yield could also be increased at higher heating rates. In this process, the drying, pyrolysis and gasification of sewage sludge were completed in a single thermal process, and the calorific value of generated gas could reach over 12 MJ m⁻³.

Keywords wet sludge; pyrolysis; gasification; hydrogen-rich fuel gas; heating value

1 引言 (Introduction)

随着我国城市化进程的加快, 污水处理率逐年提高, 污泥产量也随之急剧增加, 预计到 2010 年, 全国每年可产生脱水污泥 3.0×10^7 t 以上 (陈曼, 2006)。一般而言, 污水处理流程中产生的污泥通常

含有 95% 的水分, 为减少体积、降低运输成本及便于后续处理, 一般都会采用真空过滤法、压滤法、离心法和压带法对污泥进行机械脱水。然而处理后的脱水污泥含水率仍高达 70% ~ 80%, 这部分水分只能通过热干燥的方式去除, 而正是该过程增加了污泥处理处置的成本 (Damnguez *et al.*, 2006)。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 20876066)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 20876066)

作者简介: 熊思江 (1982-), 女, 博士研究生, E-mail: xsjbearb@yaho.com * 通讯作者 (责任作者), E-mail: bpzhang@163.com

Biography: XIONG Sijiang (1982-), female, Ph.D. candidate, E-mail: xsjbearb@yaho.com * **Corresponding author** E-mail: bpzhang@163.com

热解法作为城市污水污泥焚烧处理的替代技术,因其经济性好、二次污染小、热解产物利用价值高等优点受到了广泛关注。同时,我国城市污泥中有机物含量和热值日渐增高,也使其具备了热处理的潜力(李海英, 2006)。目前,通过对干污泥及其他生物质进行中高温热解来回收能源的工艺已成为国外研究如何处置固体废弃物的重点 (Inguanzo *et al.*, 2002; Scott *et al.*, 2002; Fyttiliet *al.*, 2008; Domínguez *et al.*, 2006), 而国内在该领域的研究仍处于起步阶段(刘文铁等, 2006; 李海英等, 2006; 王联等, 2006), 尤其是针对含水率高达 80% 左右的脱水污泥进行高温热解的研究还鲜见报道。

因此,本实验利用管式炉实验系统,研究高温下湿污泥在由自身水分蒸发所营造的水蒸气环境中,一次性完成干燥、热解及气化反应,以制取富氢燃气的热化学过程,并分析加热模式、热解终温、含水率及升温速率对气液固三态产物比例和可燃气组成的影响。同时,从污泥资源化利用和氢能发展的角度,对含水污泥热解制氢技术的可行性进行探讨,以期优化反应条件和提高富氢燃气产量提供可靠的实验数据。

2 实验材料和方法 (Materials and methods)

2.1 污泥样品

热解原料为武汉市龙王嘴污水厂经带式压滤机处理后的脱水生物污泥,其工业及元素分析如表 1 所示。由表 1 可知,该污泥含水率高达 84.2%,具有水分高、干基挥发份较高而固定碳含量低的特点。

表 1 脱水生物污泥的分析数据

Table 1 Proximate and ultimate analysis of wet sewage sludge

水份 ^a	灰份 ^b	挥发份 ^b	固定碳 ^b	碳 ^c	氢 ^c	氧 ^{c,d}	氮 ^c	硫 ^c
84.2%	52.6%	41.5%	5.9%	42.3%	3.7%	26.6%	8.3%	19.1%

注: a 收到基; b 干燥基; c 干燥无灰基; d 差值计算。

由于热解主要是针对污泥干基进行的,故根据含水率的不同,所称取的污泥量也随之不同。本实验中,每次均取含 2.5g 干基的污泥进行热解。不同含水率的污泥试样通过在鼓风干燥箱中控制风干时间得到。热解干污泥时,为使物料粒度均匀,粉碎后用 180 目的标准筛筛分。

2.2 实验装置及仪器

热解实验装置如图 1 所示,主要由载气系统、热解系统、气体冷凝及净化系统、气体体积测定及收

集系统组成。其中,载气供应系统由气瓶、表头及流量计组成,用于提供高纯氮作为热解惰性气氛;热解系统由高温管式炉组成,管式炉额定功率 2kW,额定温度 1200℃,内置石英玻璃管,进料则由金属推杆完成;气体冷凝及净化系统由置于冰水混合物中的两级 U 形管和填充有医用棉的过滤器组成;净化后的气体通过湿式流量计测量体积后进入集气袋进行收集;热解气态产物采用 Agilent3000 型气相色谱仪进行分析。

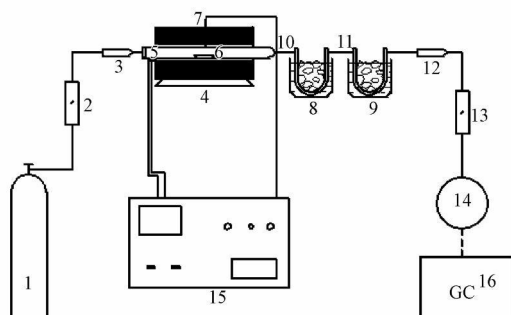


图 1 管式炉热解系统实验装置 (1 气瓶, 2 流量计, 3 干燥器, 4 管式电炉, 5 石英管, 6 瓷舟, 7 热电偶, 8, 9 冰水冷凝器, 10, 11. 冷凝 U 形管, 12 棉绒过滤器, 13 流量计, 14 集气袋, 15 温度控制器, 16 气相色谱仪)

Fig 1 Schematic of the tubular furnace pyrolysis system (1 high grade pure nitrogen source 2 gas flowmeter 3 dryer 4 tubular furnace 5 quartz reactor 6 porcelain boat 7 thermocouple 8, 9. ice bath 10, 11. U-shape tube 12 filter 13 wet gas meter 14. sample bag 15 thermostat 16 gas chromatograph)

2.3 实验方法

按照图 1 连接管路,将称量好的原料装入瓷舟置于石英管左端,实验过程中始终通入 $30\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的高纯氮气以排除系统中的空气并保持惰性气氛。待温度升至设定值后,将瓷舟迅速推至反应区,反应即刻发生,通过湿式流量计记录气态产物体积随时间的变化及产气总体积。反应 30min 后,停止加热,为防止热解产物氧化,继续通入氮气冷却至室温,取出瓷舟称量焦炭质量,计算产率。

污泥热解所得气体主要由 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 4 种气体组成,此外还有少量的 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_3H_6 和 C_3H_8 等气体。气态产物质量根据气体体积和化学组成计算得到,液态产物质量则取原料总质量与气、固态产物质量的差值。根据气体成分含量及单一气体的热值可以计算出热解气体的总热值。

3 结果 (Results)

3.1 加热模式对热解产物的影响

将含水率 84% 的污泥原样分别在两种加热模式下进行热解: ①室温作为起始温度, 在 $10^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 的升温速率下加热至 1000°C , 并保温 30 min ②当炉温升至 500°C 时, 将污泥迅速送入反应区, 并在平均升温速率为 $10^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 的情况下加热至 1000°C , 保温 30 min 一般而言, 当温度达到 150°C 左右时, 污泥中的挥发份开始析出 (Caballero *et al.*, 1997; 甘义群, 2005), 故模式 1 从 150°C 开始, 每隔 100°C 收集 2 min 气体作气相色谱分析; 而在模式 2 作用下, 样品推入炉中反应即刻发生, 为详细了解气体组分的变化, 故该模式下是每隔 50°C 收集 2 min 气体. 当温度升至 1000°C 后, 间隔 10 min 收集同样时间的气体以比较气相产物组成的变化 (1000°C 测定了 0、10、20、30 min 的数据). 加热模式对不同温度段产生的热解气体组分的影响如图 2 所示.

图 2 结果表明, 在模式 1 条件下, 当温度升至 1000°C 时才有 H_2 生成, 而 CO 则是在热解温度达到 650°C 时出现大幅增长; 在模式 2 条件下, 当热解温

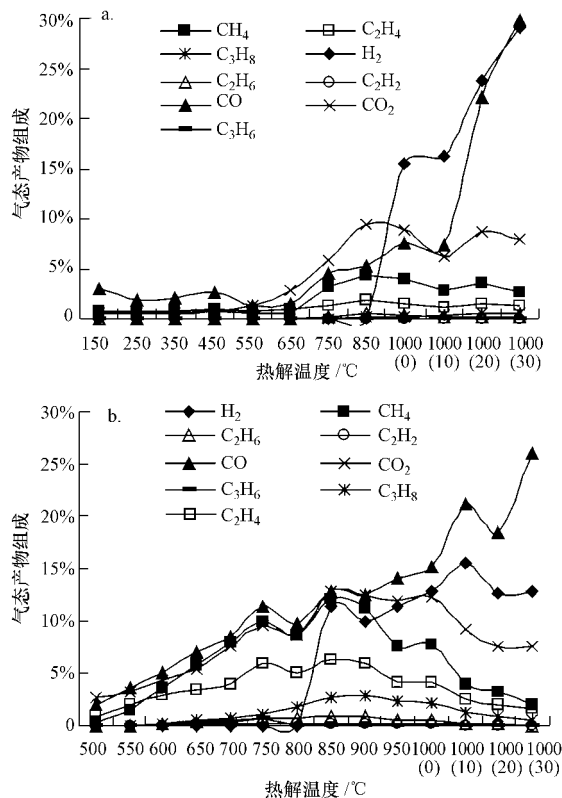


图 2 加热模式对气态产物组成的影响 (a 模式 1, b 模式 2)
Fig. 2 The effect of heating pattern on the gas components (a pattern 1, b pattern 2)

度为 850°C 时, H_2 体积分数已经达到 11%, 并在后续反应中保持平稳上升趋势, 与此同时, CO 的体积分数也随着温度的升高逐渐从 2% 增至 26%, 且模式 2 中各温度段所生成的其他气体比率明显比模式 1 作用下产生的气体比率高. 综合考虑, 将温度升至设定温度后再将物料送入反应区的加热模式 2 有利于得到富含 H_2 , CO 和 CH_4 的高品质可燃气体. 这是由于在模式 1 条件下, 污泥经历了较长的反应时间, 且能量供给过程较为平缓, 挥发份在析出并分解的初期所产生的重质烃等中间产物会由载气带出高温区间, 经冷凝形成焦油和少量气体, 令样品挥发份及中间产物含量降低, 使得后续裂解所得的气体量减少; 而模式 2 中, 脱水污泥在经历了初始热解阶段后, 产生的大分子碳氢化合物迅速发生二次裂解, 生成大量 H_2 , CO , CH_4 等小分子气体, 使得相同温度段下的可燃气体积比率显著增大, 令燃气品质得到提高. 因此, 在以回收富氢燃气为目的的高温热解过程中, 宜采用当炉温升至设定温度后再投入物料的加热模式.

3.2 温度对热解产物的影响

在 $10^{\circ}\text{C m}^{-1}$ 的升温速率下, 热解终温对含水率 84% 污泥热解后产物产率分布及气相产物热值的影响如表 2 所示. 从表 2 中可以看出, 当温度从 700°C 升至 1000°C 时, 气相产物产率得到明显提高, 液相和固相产物的产率则相应降低, 且液相产物产率的降低幅度明显高于固相产物, 说明气体的增加主要来自液相组分即焦油的二次裂解. 另外, 随着温度的升高, 热解气体的热值与其产率的变化趋势一致, 从 12624 kJ m^{-3} 提高至 14248 kJ m^{-3} , 说明温度的提高有利于得到高热值的可燃气体.

表 2 热解终温对产物的影响

Table 2 Effect of temperature on the pyrolysis of sewage sludge				
热解终温 / °C	气体产物热值 / (kJ m^{-3})	气相产物产率	液相产物产率	固相产物产率
700	12624.2	20.8%	67.8%	11.4%
800	12883.0	25.7%	63.1%	11.2%
900	13581.7	30.7%	58.6%	10.7%
1000	14248.3	36.0%	53.9%	10.1%

图 3 显示了热解终温对气相产物组成的影响 (C_3H_6 未检出). 其中, CO 和 H_2 的组成对后续制氢工艺有较大作用. 由图 3 可知, 当温度从 700°C 提高到 1000°C 时, H_2 体积分数从 11% 增加到 30%. 这是因为当温度升高时, 热解所提供的能量得到相应增

大,一方面令污泥中有机物料的 C—H 键在该能量作用下迅速断裂,生成 H_2 ; 另一方面,高温下水蒸气气化反应也有利于 H_2 的生成. 另外,气体组分中 CO 体积分数由 15% 增长为 32%; $CO + H_2$ 体积分数从 31.7% 增加为 61.8%, H_2 与 CO 体积比则从 0.56 增至 0.91; CO_2 体积分数虽然在 700~800°C 的阶段减小,但温度继续升高后 CO_2 体积分数又有所增加; CH_4 产量的变化趋势较为平缓; 而 C_2H_4 、 C_2H_6 和 C_3H_8 组分比率则出现相应降低. 这是因为在高温下,脱水污泥中固有的大量水分迅速转化为高温水蒸气,并和热解产物如 C、 CH_4 等发生如下吸热反应 (Yang *et al.*, 2007):

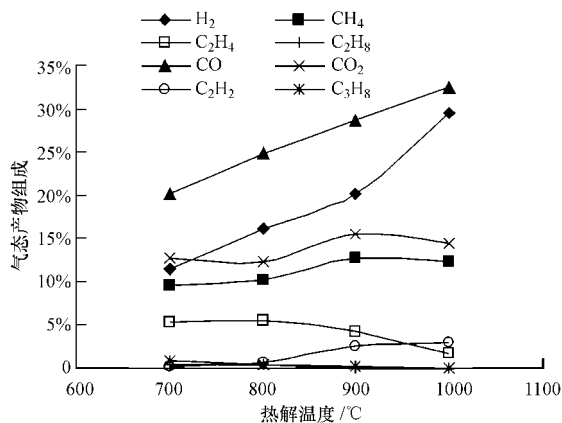
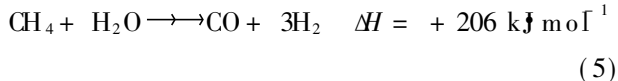
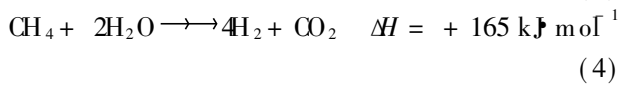
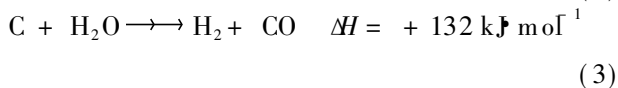
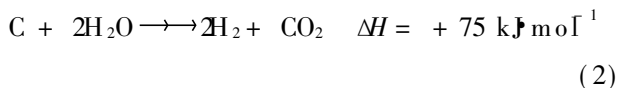
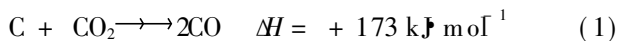


图 3 热解终温对气态产物组成的影响

Fig. 3 The effect of temperature on the gas components

由于热解过程以吸热反应为主,故提高反应温度有利于气态产物,特别是 H_2 和 CO 等小分子气体的生成. 从式 (1)、(3)、(5) 可以看出,随着热解终温的提高,上述吸热反应得到加强,CO 迅速增多; 而由反应式 (4)、(5) 可知,随着温度的升高, CH_4 发生气化反应,其含量理应迅速减少,但实验结果显示, CH_4 体积分数反而呈现上升趋势. 这是由于温度达到 450°C 时,热解产物发生二次裂解,并受温度提高及污泥所含重金属的催化作用的影响,使得脱氢

反应加剧,越来越多的大分子碳氢化合物分解释放出 H_2 和 CH_4 , 故温度升高后, CH_4 反而有所增加,这也是 C_2H_4 、 C_2H_6 等气体在温度升高过程中减少的原因. 其中,二次裂解的部分典型反应式如式 (6)、(7) 所示:



3.3 含水率对热解产物的影响

经机械脱水出厂后的城市污水污泥为高水分子物料,其含水率对 1000°C 下、升温速率 $100^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的热解产物组成和气体热值的影响如表 3 所示. 由表 3 可知,随着含水率的提高,气、液相产物产率都有相应程度的升高,而固相产物产率则随之降低. 这是由于在热解过程初期,由污泥所含水分转化成的高温水蒸气在该复杂反应体系中可能发生两种变化:一部分经冷凝后变成液态水进入热解液;另一部分一方面与同时生成的热解中间产物发生蒸汽重整反应 (式 (8)),另一方面则与焦碳发生了气化反应 (式 (2)、(3)),有利于 H_2 等气体的生成.

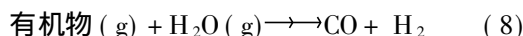
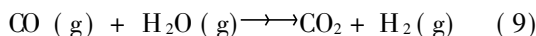


表 3 含水率对热解产物的影响

Table 3 Effect of moisture content on the pyrolysis of sewage sludge

含水率	气体产物热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	气相产 物产率	液相产 物产率	固相产 物产率
0	12420.0	30.2%	30.3%	39.5%
31%	13548.9	31.9%	34.5%	33.6%
47%	14700.8	33.4%	44.7%	21.9%
84%	14248.3	36.0%	53.9%	10.1%

含水率对热解气态产物组成的影响如图 4 所示 (其余气体未检出). 从图 4 中可以看出,随着含水率的增加, H_2 体积分数从 17% 提高到了 36%, CO_2 则由 10% 增长为 14%, 与之相反的是, CO 体积分数降低了 15%. 这可能是由于发生了水煤气转换反应:



$CO + H_2$ 的体积分数和 H_2/CO 体积比均随着含水率的增加而出现相应增长,并在含水率为 84% 时达到最大值. 与此同时, CH_4 、 C_2H_2 和 C_2H_4 的变化趋势则并不明显,这主要是由热解过程的复杂性决定的,气体产物的组成不仅仅受挥发份分解、焦油的二次裂解、残碳及有机物气化的影响,也是中间产物相互作用,发生均质及非均质反应的结果.

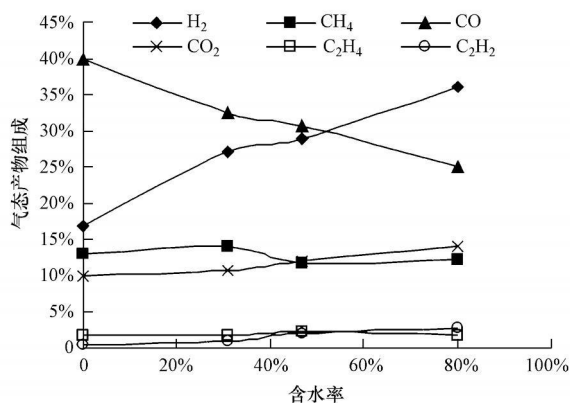


图4 含水率对气态产物组成的影响

Fig. 4 The effect of moisture content on the gas components

3.4 升温速率对热解产物的影响

不同升温速率对含水率为 84% 的污泥在 1000°C 下热解的影响如表 4 所示。从表 4 中可以看出, 当热解升温速率从 $22^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 提高到 $100^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 时, 气态产物产量由 31.9% 升至 36%, 液态产物产量则由 57.8% 下降到 53.9%, 固态产物产量变化不大。这说明在高温条件下提高污泥热解的升温速率有利于液态产物的二次裂解和气态产物的生成。这主要是因为气体和焦油的产率在很大程度上是由挥发分的一次裂解和焦油的二次裂解反应决定的, 提高升温速率可使物料在较短时间内达到设定温度, 令挥发分在高温环境下的停留时间增加, 促进二次裂解的进行, 使得燃气产率提高, 焦油产率下降。另外, 在一定的热解时间内, 低升温速率可延长物料在低温区的停留时间, 促进脱水和炭化反应, 导致炭产率增加。由于本实验中的热解温度高达 1000°C, 物料在反应区内也经历了足够长的停留时间, 反应较为完全, 改变升温速率对其影响不大, 故所得气体的热值无明显变化趋势。

表4 升温速率对热解产物的影响

Table 4 Effect of heating rate on the pyrolysis of sewage sludge

升温速率 $/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1})$	气体产物热值 $/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$	气相产物 产率	液相产物 产率	固相产物 产率
22	16984.8	31.9%	57.8%	10.3%
51	14934.8	33.0%	56.8%	10.2%
80	15553.42	34.0%	55.9%	10.1%
100	14248.28	36.0%	53.9%	10.1%

从图 5 可以看出, 随着升温速率的提高, H_2 体积分数增长十分显著, 而 CO 的体积则从 36% 下降为 32%, $\text{CO} + \text{H}_2$ 体积分数从 57% 增加为 62%, $\text{H}_2 /$

CO 体积比则从 0.59 增至 0.91。另一方面, C_2H_4 、 C_2H_6 和 C_3H_8 都有小幅下降, 这也验证了提高升温速率能在一定程度上延长物料在高温区的停留时间, 有利于大分子气体发生二次裂解, 生成 H_2 等小分子碳氢气体, 令热解反应更为完全。

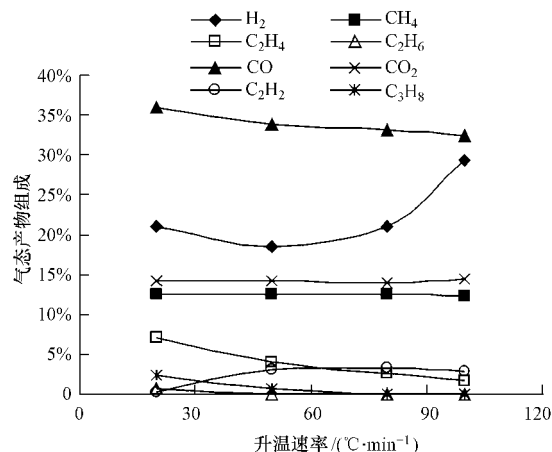


图5 升温速率对气态产物组成的影响

Fig. 5 The effect of heating rate on the gas components

4 结论 (Conclusions)

1) 将温度升至设定温度 (500°C) 后再将物料送入反应区的加热模式可使脱水污泥热解产生的大分子碳氢化合物迅速发生二次裂解, 不但使得气体产量增大, 还有利于得到富含 H_2 、 CO 和 CH_4 的高品质可燃气体。

2) 由于热解过程以吸热反应为主, 故提高反应温度有利于气态产物, 特别是 H_2 和 CO 等小分子气体的生成, 并使得热解气热值从 700°C 时的 $12624 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 提高至 1000°C 时的 $14248 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

3) 随着含水率的提高, H_2 的体积分数从 17% 提高到了 36%, $\text{CO} + \text{H}_2$ 的体积分数和 H_2 / CO 体积比均出现了相应增长, 并在含水率为 84% 时达到最大值, 这一方面是因为高温水蒸气与同时生成的热解中间产物发生了蒸气重整反应; 另一方面则是其与残碳发生了气化反应, 有利于 H_2 的生成。

4) 提高升温速率可使物料在较短时间内达到设定温度, 令挥发分在高温环境下的停留时间增加, 促进液态产物的二次裂解和气态产物的生成。

责任作者简介: 章北平, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事新型污水生物生态处理技术与成套设备研究。E-mail: bpzhangpr@163.com.

参考文献 (References):

- Caballero J A, Front R, Marcilla A, *et al*. 1997. Characterization of sewage sludges by primary and secondary pyrolysis [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 40-41(5): 433-450
- 陈曼. 2006. 城市污水污泥热解特性与转化机理的研究 [D]. 南京: 东南大学. 1
- Chen M. 2006. Study on the mechanism of thermal pyrolysis properties and conversion process for municipal [D]. Nanjing Southeast University. 1 (in Chinese)
- Damnguez A, Mendez J A, Inguanzo M, *et al*. 2006. Production of bio-fuels by high temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating [J]. *Bioresour Technol* 97: 1185-1193
- Damnguez A, Mendez J A, Pis J J, *et al*. 2006. Hydrogen rich fuel gas production from the pyrolysis of wet sewage sludge at high temperature [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 77: 127-132
- Fytli D, Zabanitou A. 2008. Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods-A review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(1): 116-140
- 甘义群. 2005. 城市污泥热解特性及资源化利用新方法试验研究 [D]. 武汉: 中国地质大学. 28
- Gan Y Q. 2005. Pyrolysis characteristics of sewage sludge and new approaches of its utilization [D]. Wuhan China University of Geosciences 28 (in Chinese)
- Inguanzo M, Damnguez A, Mendez J A, *et al*. 2002. On the pyrolysis of sewage sludge the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fraction [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 63 209-222
- 李海英. 2006. 生物污泥热解资源化技术研究 [D]. 天津: 天津大学. 4-5
- Li H Y. 2006. Study on the pyrolysis and resource recovery technology of sewage sludge [D]. Tianjin: Tianjin University. 4-5 (in Chinese)
- 李海英, 张书廷, 赵新华. 2006. 城市污水污泥热解温度对产物分布的影响 [J]. *太阳能学报*, 27(8): 835-840
- Li H Y, Zhang S T, Zhao X H. 2006. Influence of pyrolysis temperature of sewage sludge in product distribution [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica* 27(8): 835-840 (in Chinese)
- 刘文铁, 王淑彦, 陆慧林, 等. 2006. 污泥的热解动力学及机理研究 [J]. *热能动力工程*, 21(5): 529-531
- Liu W T, Wang S Y, Lu H L, *et al*. 2006. An investigation of sludge pyrolytic dynamics and its mechanism [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy & Power* 21(5): 529-531 (in Chinese)
- Scott S A, Dennis J S, Davidson J F, *et al*. 2002. Thermogravimetric measurements of the kinetics of pyrolysis of dried sewage sludge [J]. *Fuel* 85: 1248-1253
- 王联, 魏立安, 李海滨, 等. 2006. 剩余污泥的热解反应动力学研究 [J]. *江西科学*, 24(3): 296-299
- Wang L, Wei L A, Li H B, *et al*. 2006. Study of thermal pyrolysis kinetics of civil sludge [J]. *Jiangxi Science*, 24(3): 296-299 (in Chinese)
- 杨国来, 陈汉平, 米铁, 等. 2007. 不同因素对生物质气化产气特性的影响 [J]. *可再生能源*, 25(3): 34-38
- Yang G L, Chen H P, Mi T, *et al*. 2007. Influence of different procedure parameters on the characteristics of producer gas from biomass gasification [J]. *Renewable Energy Resource* 25(3): 34-38 (in Chinese)