

生物质燃气中固体颗粒物的临氧燃烧研究

江俊飞^{1,2}, 郎 林¹, 阴秀丽¹, 吴创之¹

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 利用固定床反应器, 模拟研究生物质空气气化燃气(BAG)和燃气中固体颗粒物(PBG)在高温陶瓷过滤材料上的临氧燃烧规律。结果表明: 当过滤温度为 300~450 °C 且燃气氧含量 $\leq 4\%$, BAG 燃气通过洁净的高温过滤介质时, 可燃气体组分几乎不发生氧化反应, 但同条件下, BAG 燃气通过负载有 PBG 颗粒物的的高温过滤介质时, PBG 可与 O₂ 发生明显的临氧燃烧反应。通过试验分析可知 PBG 在高温过滤中发生临氧燃烧的合适运行条件为燃气氧含量 $\leq 2\%$, 温度为 300~450 °C。

关键词: 生物质; 气化; 高温氧化; 过滤; 合成气

中图分类号: S216.2; TK6 **文献标识码:** A

0 引 言

生物质空气气化(BAG)技术作为优先开发的新能源技术之一, 近年来受到越来越多的关注^[1,2]。然而, 从气化炉出来的粗燃气会携带一定量的固体颗粒物(PBG)和焦油, 在工程应用中易造成设备堵塞等危害, 严重制约生物质气化技术的应用和发展。

近几年, 随着陶瓷复合膜类高温过滤材料的发展, BAG 燃气高温过滤净化技术受到越来越多的关注^[3-7], 但我国在 BAG 燃气高温过滤净化方面的研究相对较少, 多集中在生物质焦油及其模型化合物的高温热裂解和催化裂解方面^[8-11]。最近中国科学院广州能源研究所进行了大量 BAG 燃气高温过滤净化方面的工程应用研究, 建立了 2000 Nm³/h 处理量生物质气化-净化的示范装置^[12-14]。

工程试验研究表明^[15], 通过向高温 BAG 燃气中适度补氧的方式, 可促进 PBG 固体颗粒物在过滤介质表面上的临氧燃烧反应(固体颗粒物在一定温度和低 O₂ 浓度下发生的缓慢燃烧过程), 既可解决除尘管堵塞问题, 又可在无催化剂条件下实现除尘除焦一体化。然而现有文献中尚缺乏对这种特殊

现象规律内在原理的深入分析研究。基于此, 本文在实验室规模下研究模拟 BAG 燃气在高温陶瓷过滤器中的氧化规律, 进而考察适于 PBG 颗粒物的临氧燃烧条件及其特性, 以期 BAG 燃气的高温过滤净化技术提供一定的理论依据。

1 实 验

1.1 实验样品

PBG 颗粒物取自于某公司生物质气化供热示范现场的净化系统。实验前首先对该 PBG 颗粒物进行粉碎筛分, 然后选取粒径为 0.15~0.20 mm 的粉末样品烘干, 最后将 PBG 粉末置于管式炉中并在 N₂ 气氛下进行预处理, 以使样品具有较好的均一性, 其最终元素分析和工业分析如表 1 所示。上述高温预处理的实验步骤为: 1) 在瓷方舟中放置 PBG 粉末 20 g; 2) N₂ 流速为 200 mL/min; 3) 以 10 °C/min 的升温速率升温至 400 °C 后立刻取出, 并在 N₂ 气氛下冷却至室温。实验中采用的 BAG 燃气为广州普源气体有限公司生产的标准混合气, 气体成分为 10% H₂、15% CO₂、22% CO、3% CH₄ 和 50% N₂, 纯 O₂ 的添加通过质量流量计控制。

收稿日期: 2016-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(51306193; 51676192); 广州市科技计划(201707010237)

通信作者: 郎 林(1980—), 男, 博士、副研究员, 主要从事生物质燃气高温净化方面的研究。langlin@ms.giec.ac.cn

表1 PBG 实验原料的元素分析和工业分析

Table 1 Ultimate and proximate analysis of the PBG materials

工业分析/%,ad				元素分析/%,ad				低位发热量/MJ·kg ⁻¹
水分	灰分	挥发分	固定碳	[C]	[H]	[N]	[S]	
2.51	19.58	16.84	61.07	63.62	3.50	0.89	0.98	23.65

1.2 实验装置

实验在自制的石英管陶瓷过滤器上进行。图 1 为实验系统的示意图。过滤器的主体为内径 20 mm、长 200 mm,中间含有一层厚度为 5 mm 陶瓷过滤介质的石英管反应器。过滤器内部温度通过伸入石英管内的热电偶测定,其程序升温过程通过加热炉控制。在考察 BAG 燃气氧化反应时,热电偶底端靠近陶瓷过滤介质的表面中心位置,用于监控高温过滤温度(T_F);在考察 PBG 颗粒物燃气氛围下的临氧燃烧规律时,热电偶下端位于 PBG 颗粒物的中心。冷凝系统主要由 3 个洗气瓶组成,第 1 个洗气瓶加入少量水,第 2 个和第 3 个洗气瓶加入变色硅胶。

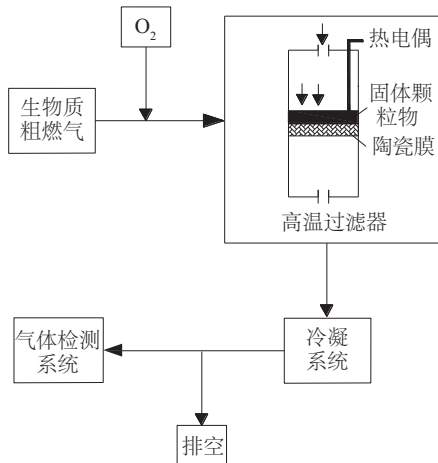


图1 燃气高温过滤实验系统图

Fig. 1 System diagram of hot gas filtration

1.3 实验方法和条件

1.3.1 BAG 燃气的氧化实验

在燃气氧化实验中,不加入 PBG 颗粒物。当过滤温度达到预设温度并稳定后(升温速率为 3.0 ℃/min),通过质量流量计配比含有一定比例 O₂ 的 BAG 燃气,经过气体混合罐通入高温过滤器中,反应后的气体通过冷凝系统后进入色谱检测。进入过滤器中的含氧 BAG 燃气的总流量为 100 mL/min(标准状况下的表面过滤速率为 0.53 cm/s),过滤温度范

围为 300~600 ℃。为消除色谱误差,每次实验前需对配比的混合气进行组分检测。实验中每隔 50 ℃对从反应器出来的燃气进行组分分析,且每个温度条件的气体组分重复检测 3 次以上,本文的实验结果取其平均值。由于 BAG 燃气中含有大量 H₂、CO 和 CH₄ 等可燃组分,如混入空气,可能会引发爆炸,因此在燃气中引入 O₂ 必须考虑爆炸极限。研究表明^[16-17],通过理论计算可较好预估可燃气的爆炸极限,本文采用文献[17]中含氧燃气的爆炸极限理论计算方法,计算含氧 BAG 燃气的爆炸极限。计算结果表明,当 BAG 燃气中 O₂ 含量低于 8.5%时,不会发生爆炸。出于安全考虑,实验中 BAG 燃气的 O₂ 添加量为 0%~8.0%。

文中低位燃气热值定义为 q ,单位为 MJ/m³(标准状态),采用如式(1)计算。定义 q_{in} 为过滤器进口处 BAG 燃气的低位热值, q_{out} 为过滤器出口处 BAG 燃气的低位热值。BAG 燃气的热值百分比(q_r)采用式(2)计算。

$$q = \frac{\eta_{CO} \times 126.36 + \eta_{H_2} \times 107.98 + \eta_{CH_4} \times 358.18}{1000} \quad (1)$$

$$q_r = \frac{q_{out}}{q_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, η_{H_2} 、 η_{CO} 、 η_{CH_4} ——H₂、CO、CH₄ 的体积比含量。

1.3.2 PBG 颗粒物的临氧燃烧实验

在 PBG 临氧燃烧实验中,固体颗粒物负载于陶瓷过滤介质表面,每次负载量为 2.00 g(相当于过滤介质表面积灰量为 6.37 kg/m²)。实验前首先通入 100 mL/min 的 N₂ 保护气体,当过滤器内温度升至预设温度并稳定后(升温速率为 3.0 K/min),立刻切换成 100 mL/min 的含氧混合燃气,并采用 1.3.1 节中的方法对反应后气体进行 GC 检测分析,每隔 20 分钟采集 1 次气样。反应结束后立即切换成 N₂ 保护气体(100 mL/min)。系统冷却至 100 ℃以下再取出固体颗粒物。过滤器内 PBG 颗粒物的临氧燃烧过程在设定的恒温条件下进行,其有效恒温反应时间

均为 5 h, 本文所示结果为该段时间内的平均值。

文中定义 ΔX 为气体中 x 组分浓度的变化率, 正值为增加率, 负值为减少率; ΔC 为燃气中碳增量, 单位为 mmol/min。具体计算如式(3)、式(4)所示:

$$\Delta X = \frac{x_{\text{out}} - x_{\text{in}}}{x_{\text{in}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\Delta C = C_{\text{out}} - C_{\text{in}} \quad (4)$$

式中, x_{in} ——过滤器进口处燃气中 x 组分的浓度, mmol/min; x_{out} ——过滤器出口处燃气中 x 组分的浓度, mmol/min; C_{out} ——过滤器出口气体(CO , CO_2 , CH_4)所含有的碳总含量; C_{in} ——过滤器进口气体(CO , CO_2 , CH_4)所含有的碳总含量, mmol/min。

1.4 仪器分析与表征

采用日本岛津公司的 GC-2014 气相色谱仪进行气体组分的检测, 采用 TCD 检测器确定气体中各组分浓度, 使用的分离柱为 Propark Q 和 5A 分子筛。对反应前后的 PBG 颗粒, 采用德国元素系统分析公司生产的元素分析仪(型号为 Vario EL cube)进行元素分析, 根据 GB/T 28731—2012 固体生物质燃料工业分析方法进行工业分析, 采用日本 Hitachi 公司的 S4800 场发射扫描电镜(SEM)检测样品的微观形貌, 采用美国 Quantachrome 公司 Autosorb-iQ-C/ ChemBET Pulsar 全自动程序升温物理吸附分析仪检测样品的 BET 比表面积(样品在 280 °C 脱气 10 h 后测定), 使用 BET 方法计算比表面积。

2 结果和讨论

2.1 BAG 燃气的氧化规律

本文研究了混入不同比例 O_2 的 BAG 燃气通过高温过滤器时各组分浓度的变化规律如图 2 所示。当 $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_f \leq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 燃气中各组浓度变化不明显; 当 $T_f > 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 燃气中的 H_2 、 CO 和 CH_4 浓度明显减少, CO_2 浓度大幅增加, 说明燃气中可燃组分发生了氧化反应, 且燃气中 O_2 含量越高, 该现象越显著(图 3)。对比燃气中不同组分的含量变化结果可知, H_2 发生氧化反应的温度最低, CO 次之, CH_4 最高, 这说明 H_2 是 BAG 燃气中最易与 O_2 发生氧化的组分。因此, 在 PBG 颗粒物临氧燃烧实验时应尽量避免温度高于引起 H_2 与 O_2 发生明显氧化反应的温度。图 3 的燃气热值分析结果也表明, 当在

$300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_f \leq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过滤温度下且燃气氧含量 $\leq 4\%$ 时, 燃气热值基本无变化, 说明此条件下, BAG 燃气不会发现明显的氧化反应。

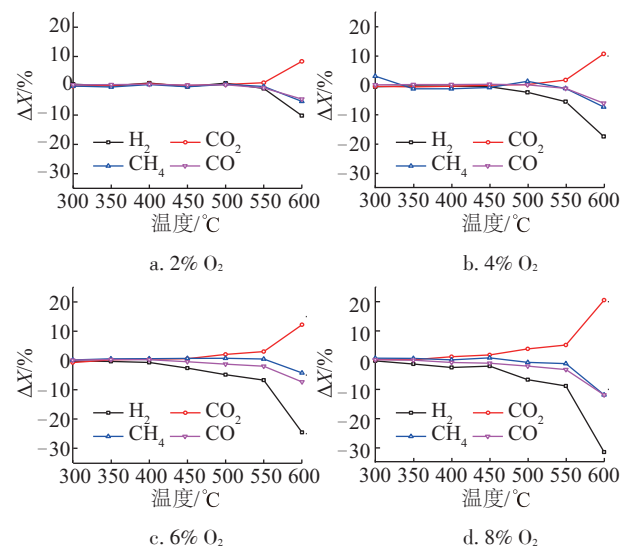


图2 不同氧含量下燃气各组分随过滤温度的变化规律
Fig. 2 T_f dependent change in the component concentration of BAG gas with different O_2 content

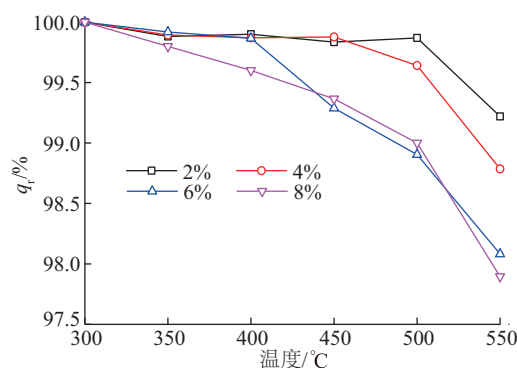


图3 不同氧含量下出过滤器与进过滤器的燃气热值比随过滤温度的变化规律

Fig. 3 T_f dependent change in the q_t of BAG gas with different O_2 content

2.2 高温过滤中 PBG 颗粒物的临氧燃烧

2.2.1 温度的影响

实验通过在线检测高温过滤条件下 BAG 燃气中各气体组分的变化规律, 来判断燃气中 PBG 颗粒物可能发生的临氧燃烧反应。如图 4 所示, 当 T_f 从 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升至 $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 可燃组分中的 H_2 和 CO 浓度总体呈逐渐减少的趋势, 而 CH_4 浓度则略微增加, 但不明显。对比 BAG 燃气中 H_2 和 CO 浓度的变化规律, 不难发现不同温度下二者的反应规律尚略有

差异。当 $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_f \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, H_2 浓度基本不变, $T_f \geq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后 H_2 浓度才开始明显减少; 而 $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_f \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, CO 浓度少量增加且在该温度范围内增幅基本不变, $T_f \geq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, CO 浓度才明显减少。此外在高温过滤条件下, 体系中的 CO_2 浓度随温度的升高迅速增加, 且其增幅远大于体系中 CO 和 CH_4 的减少量, 而燃气中 O_2 浓度迅速减少, 在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 几乎被完全消耗。结合图 5 中的 q_r 和 ΔC 随温度变化曲线可知, 当 $300\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_f \leq 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 体系内的可燃组分浓度略有增加, 导致 $q_r > 100\%$, 而燃气体系内 ΔC 增大, 说明此温度范围内 BAG 燃气不易发生氧化反应, 而 PBG 颗粒物会发生一定量的临氧燃烧而生成极少量的 CO 等可燃气; 当 $T_f = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, q_r 有所降低, 但仍大于 100% , 说明少量可燃组分发生氧化反应对燃气整体热值影响不大, 此时燃气体系内 ΔC 有最大值; 当 $T_f \geq 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 体系内可燃组分浓度明显减少, 导致 $q_r < 100\%$, 此时燃气体系内 ΔC 有所降低, 表明此时 BAG 燃气的氧化反应显著。上述现象说明, 在 $300\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温条件下, BAG 燃气氧化反应和 PBG 颗粒物的临氧燃烧反应会同步进行并存在一定竞争关系, 但总体上 PBG 颗粒物的临氧燃烧反应明显占优, 其原因极有可能为: 1) 燃气中 H_2 着火点最低, 为 $563\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[18], 而 PBG 颗粒物成分复杂, 其发生燃烧温度在 $400\sim 510\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[19], 低于 H_2 着火点; 2) 燃烧一旦形成, 由于放热导致温度迅速升高, 气体在 O_2 中的燃烧速率远高于固体颗粒, 但本实验在低 O_2 条件下进行, 无法形成稳燃状态。因此, 由于 PBG 颗粒物反应的影响, 燃气在 $300\sim 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下可发生少量氧化反应, 但 PBG 颗粒物的临氧燃烧反应占主导。在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 燃气热值略有增加且 PBG 颗粒物燃烧量最大, 所以 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最适宜的过滤器运行温度。

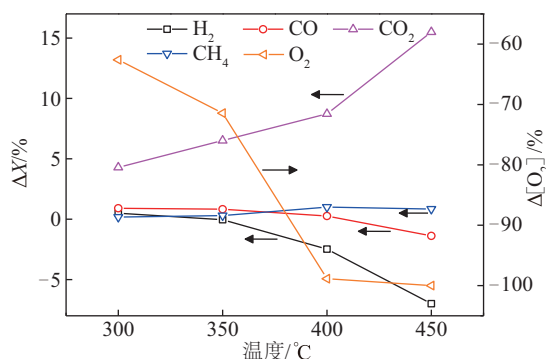
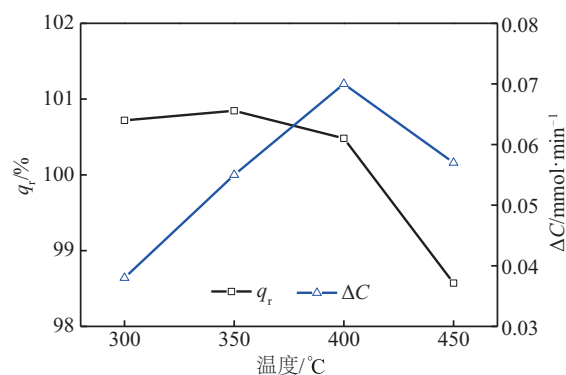
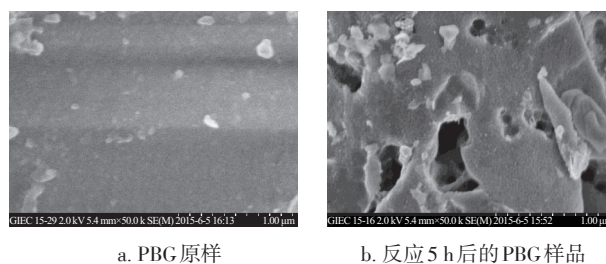


图4 不同过滤温度下燃气中各组分含量的变化规律

Fig. 4 Component concentration change of BAG gas at different T_f 图5 过滤温度对 q_r 和 ΔC 的影响Fig. 5 Effect of T_f on q_r and ΔC

为直接表明 PBG 颗粒物发生了临氧燃烧反应并分析其变化过程, 对 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下发生临氧燃烧反应的 PBG 样品的微观结构进行分析表征, 分别采用电镜扫描 (SEM) 和 N_2 物理吸附仪分析 PBG 颗粒物表面形态和比表面积在反应前后的变化规律。如图 6 所示, PBG 原料的颗粒结构较为完整, 且表面较为平整, 此时实验测得比表面积仅为 $9.83\text{ m}^2/\text{g}$, 其 C 元素含量为 63.62% ; 经过 5 h 临氧燃烧后, PBG 的原有结构开始破碎塌陷, 表面变得粗糙不平, 出现很多小坑或小孔结构, 实验测得比表面积也增至 $147.51\text{ m}^2/\text{g}$, C 元素含量减少为 58.07% 。由此说明 PBG 颗粒物会与 O_2 反应, 使 PBG 颗粒物表面形成大量多孔结构特征, 最终使样品比表面积大幅增加。

图6 PBG 样品在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 临氧燃烧前后的 SEM 分析Fig. 6 SEM analysis showing different morphologies in the sample before and after partial oxidation at $400\text{ }^{\circ}\text{C}$

2.2.2 O_2 的影响

以上实验结果表明 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最适宜 PBG 在过滤器中发生临氧燃烧的温度, 此外 2.1 节中实验结果显示燃气氧含量为 6% , 温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 燃气热值基本不变。基于此, 考察温度为 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、氧含量 $\leq 6\%$ 时 PBG 颗粒物的临氧燃烧规律。

如表 2 所示, O₂ 含量对可燃气体组分中 H₂ 和 CH₄ 变化规律无较大影响, 但对 CO 和 CO₂ 具有较大影响, 主要表现为提高 O₂ 含量, 产气中 CO 和 CO₂ 浓度明显增加, 使燃气热值提高、碳增量增加。这些现象都表明, 在一定范围内提高 BAG 燃气中的氧含量, 能较大幅度地促进 PBG 颗粒物的临氧燃烧反应, 提高过滤器出口燃气热值, 而与此同时对 BAG 燃气中可燃组分临氧燃烧造成的影响可忽略不计。此外, 表 2 中显示产气中耗氧率(O₂ 的减少率)随初始 BAG 燃气中氧含量增加逐渐降低说明 O₂ 的有效使用率降低。当进入过滤器中的 BAG 燃

气氧含量为 2% 时, 耗氧率为 98.85%, 产气中氧含量极低, 为 0.023%; 而当初始氧含量增加到 6% 时, 耗氧率下降 63.97%, 即产气中氧含量增加到 2.16%。在 BAG 燃气后续的净化和运输, 由于涉及燃气安全问题, 氧含量越低越好。如在后续净化中, 有研究^[20]提出生物质行业中燃气应以含量在 1.5% 为报警极限的论断。因此在气体过滤速率为 0.53 cm/s, PBG 颗粒物为 6.37 kg/m² 时, 尽管提高氧含量有利于 PBG 颗粒物的临氧燃烧, 但从安全和尽可能消耗 BAG 燃气中 O₂ 的角度出发, 进入过滤器中的 BAG 燃气 O₂ 含量应不高于 2 %。

表 2 燃气氧含量对气体组分的影响(T_r=400 ℃)
Table 2 Effect of O₂ on gas components (T_r=400 ℃)

氧含量/%	气体组分变化率/%					q _d /%	ΔC/(mmol·min ⁻¹)
	Δ[H ₂]	Δ[CO ₂]	Δ[CO]	Δ[CH ₄]	Δ[O ₂]		
2	-2.59	10.12	0.26	1.83	-98.85	100.48	0.07
4	-2.01	19.91	3.48	1.81	-81.89	101.51	0.18
6	-2.09	26.26	5.67	2.01	-63.97	103.21	0.24

3 结 论

1) 在氧含量小于 4%、温度 300~450 ℃ 的条件下, BAG 燃气中的可燃组分不易发生氧化反应; 但当温度高于 450 ℃ 时, 燃气中部分可燃组分开始发生氧化反应, 且燃气氧含量越高, 燃气中可燃成份发生氧化反应的速度越快。

2) 在氧含量为 2%、温度 300~400 ℃ 的条件下, BPG 颗粒物与 O₂ 发生临氧燃烧反应的速度明显高于可燃组分的氧化反应速度, 且温度越高, BPG 颗粒物的临氧燃烧速度越快; 但当温度高于 400 ℃ 时, BAG 燃气中可燃组分与氧发生的氧化化反应将明显加快。

3) 在 400 ℃ 时, 提高燃气氧含量, 对燃气中可燃组分氧化反应的规律无明显影响, 但可促进 BPG 颗粒物临氧燃烧, 最终使燃气热值提高。考虑到燃气安全和氧利用率, O₂ 含量应不高于 2%。

综上所述, 为了有利于燃气中 BPG 颗粒物临氧燃烧, 减少高温过滤阻力, 同时又能保证燃气成份和热值相对稳定, 生物质燃气高温过滤合适的运行条件为: 燃气中氧含量控制在低于 2%, 高温过滤温

度为 300~450 ℃。

[参考文献]

[1] 吴创之, 刘华财, 阴秀丽. 生物质气化技术发展分析[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(7): 798—804.

[1] Wu Chuangzhi, Liu Huacai, Yin Xiuli. Status and prospects for biomass gasification[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(7): 798—804.

[2] Wu Chuangzhi, Yin Xiuli, Yuan Zhenhong, et al. The development of bioenergy technology in China[J]. Energy, 2010, 35(11): 4445—4450.

[3] Patrick J W, Robert C B. A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas[J]. Biomass and Bioenergy, 2013, 52(3): 54—84.

[4] Steffen H. Hot gas filtration—A review[J]. Fuel, 2013, 104(2): 83—94.

[5] Lupion M, Navarrete B, Alonso-Fariñas B, et al. Hot gas filters for coal-based power generation systems: Operating experiences[J]. Fuel, 2013, 108(11): 24—30.

[6] Sarah S, Elena Y, Steffen H, et al. Corrosion of silicon carbide hot gas filter candles in gasification environment[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34

- (3): 575—588.
- [7] Marc B, Sarah S, Michael M. Investigation of alkali induced corrosion of SiC filter candles at high temperature, in gasification environment[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(4): 1041—1044.
- [8] 杨国来. 生物质在流化床中的催化气化焦油及裂解的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [8] Yang Guolai. The experimental study of biomass catalytic gasification and tar cracking in fluidized bed gasifier[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [9] Wu Wengang, Luo Yonghao, Chen Yi, et al. Experimental investigation of tar conversion under inert and partial oxidation conditions in a continuous reactor[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(6): 2721—2729.
- [10] Meng Kong, Yang Qi, Fei Jinhua, et al. Experimental study of Ni/MgO catalyst in carbon dioxide reforming of toluene, a model compound of tar from biomass gasification[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(18): 13355—13364.
- [11] Wang Tiejun, Li Yuping, Wang Chenguang, et al. Synthesis gas production with NiO-MgO/-Al₂O₃/cordierite monolithic catalysts in a pilot-scale biomass-gasification-reforming system[J]. Energy & Fuels, 2011, 25(3): 1221—1228.
- [12] 阴秀丽, 吴晋沪, 定明月, 等. 千吨级生物质气化成液体燃料关键技术与示范[R]. 455860816-2011BAD22B06/01, 2011.
- [13] 郎林, 谢建军, 杨文申, 等. 改性陶瓷管高温净化生物质粗燃气的研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8): 1665—1668.
- [13] Lang Lin, Xie Jianjun, Yang Wenshen, et al. Hot gas filtration performance of modified ceramic candles for biomass gasification[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(8): 1665—1668.
- [14] 郎林, 阴秀丽, 吴创之, 等. 一种生物质粗燃气高温除尘除焦一体化净化工艺[P]. 中国: 201310590071.7, 2013-11-20.
- [15] 吴创之, 应浩, 李冬梅, 等. 生物质气化发电与热电联供系统研究[R]. 455860816-2012BAA09B03/01, 2012.
- [15] Wu Chuangzhi, Ying Hao, Li Dongmei, et al. Research on power generation from biomass gasification and the combined heating and power system[R]. 455860816-2012BAA09B03/01, 2012.
- [16] 李国梁, 潘勇, 蒋军成. 可燃气体空气氮气混合物爆炸极限的预测[J]. 天然气化工, 2012, 37(1): 45—48.
- [16] Li Guoliang, Pan Yong, Jiang Juncheng. Prediction of flammability limits of gaseous mixtures of combustible-air-nitrogen[J]. Natural Gas Chemical Industry, 2012, 37(1): 45—48.
- [17] 吴建峰, 孔庆妨, 保东. 混合气爆炸极限的理论计算方法[J]. 油气储运, 1994, 13(5): 10—12.
- [17] Wu Jianfeng, Kong Qingfang, Bao Dong. Theoretical calculation methods for the explosion limit of a mixed gas[J]. OGST, 1994, 13(5): 10—12.
- [18] 刘庆滨, 张宗珩, 乔晓磊, 等. H₂/CO/CH₄/CO₂混合燃气着火温度的实验研究[J]. 煤炭转化, 2011, 34(4): 46—49.
- [18] Liu Qingbin, Zhang Zongheng, Qiao Xiaolei, et al. Experimental study on the ignition temperature of hydrogen-carbon monoxide-methane-carbon dioxide mixtures[J]. Coal Conversion, 2011, 34(4): 46—49.
- [19] Miguel G S, Domínguez M P, Hernándezb M, et al. Characterization and potential applications of solid particles produced at a biomass gasification plant[J]. Biomass Bioenerg, 2012, 47(4): 134—44.
- [20] 郭东彦, 伊晓路, 闫桂焕, 等. 电捕焦油器用于生物质燃气净化及燃气允许最高氧含量的研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(10): 52—54.
- [20] Guo Dongyan, Yi Xiaolu, Yan Guiguan, et al. Researching of electro tar precipitator used in biomass gas's cleaning and allowed highest oxygen content in the gas[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(10): 52—54.

PARTIAL OXIDATION OF SOLID PARTICLES FROM BIOMASS GASIFICATION IN ATMOSPHERE OF FLAMMABLE GAS

Jiang Junfei^{1,2}, Lang Lin¹, Yin Xiuli¹, Wu Chuangzhi¹

(1. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The partial oxidation of simulated biomass air gasification (BAG) and solid particles produced by biomass gasification (PBG) is investigated in the ceramic filter using a lab-scale fixed reactor. The results reveals that the flammable gas had no reaction with the O₂ when the BAG gas passes through a clean filter media under the conditions that temperature is 300-450 °C and O₂ ratio is less than 4%. However, significant partial oxidation of PBG happens when the BAG gas passes through a filter media with the PBG on the surface at the same conditions. Analysis from the tests suggests that the suitable O₂ ratio and temperatures for partial oxidation of PBG are no more than 2% and from 300 °C to 450 °C, respectively.

Keywords: biomass; gasification; thermooxidation; filtration; synthesis gas