

改进型固定床上吸式气化炉及其在蒸汽锅炉中的 代油燃烧应用*

杜海江^{1†}, 郭常青², 徐冰嬿², 李宗楠², 刘光华³

(1. 中科院广州电子技术有限公司, 广州 510070; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640;
3. 东莞市百大新能源股份有限公司, 广东 东莞 523808)

摘要: 在蒸汽锅炉进行生物质能源改造中, 生物质气化燃气代替煤、油具有成本、环保、政策方面的优势, 但必须解决焦油的二次污染问题。本文提出以改进型即中部出气固定床上吸式气化炉生产生物质可燃气, 及焦油成分随燃气直接在锅炉炉膛燃烧的技术路线, 并以 2 T/h 蒸汽锅炉为例对气化炉的主要结构参数进行设计计算。采用基于锅炉输出蒸汽压力的气化炉鼓风机自适应控制方法实现系统的闭环控制。最后通过实际应用案例实测数据的热能计算证明生物质气化燃气在蒸汽锅炉中代替煤、油燃烧的可行性。

关键词: 生物质气化燃气; 生物质锅炉; 锅炉燃料; 改进型上吸式气化炉

中图分类号: TK6; TP273+2

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.03.003

The Improved Updraft Fixed-bed Biomass Gasifier and Its Application in Steam Boiler Instead of Fuel Oil

DU Hai-jiang¹, GUO Chang-qing², XU Bing-yan², LI Zong-nan², LIU Guang-hua³

(1. Chinese Academy of Sciences Guangzhou Electronic Technology Co., Ltd., Guangzhou 510070, China;
2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;
3. Dongguan Baida New Energy Shares Co., Ltd., Dongguan 523808, China)

Abstract: For biomass energy transformation in steam boilers, gasification gas has more advantages than coal or oil, such as cost, environmental protection, and policy benefits. However, we must solve the problem of secondary pollution out of tar in its application. In this paper, firstly we propose an improved technical solution, which can produce high heat value, low tar content biomass gas by updraft fixed-bed biomass gasifier with gas outlet in the middle position, and the tar composition burned directly in boiler furnace with biomass gas. Based on the technical solution, we take 2 T/h steam boiler for example to design and calculate the main structure parameters of the gasifier. Next, we provide an intelligent adaptive control on air supply of gasifier according to steam pressure. Finally, the feasibility and efficiency of biomass gas as a new boiler fuel was proved through the test data in practical application cases.

Key words: biomass gas; biomass boiler; fuel of boiler; improved updraft fixed-bed biomass gasifier

0 前言

生物质能源在锅炉行业早有应用, 以成型燃料为主。生物质秸秆或木材通过粉碎、干燥、机械加压等过程, 制成结构紧密的砖型、棍型或颗粒状燃料, 这些生物质成型燃料便于贮运, 燃烧后排放的烟灰和 SO₂ 都远低于煤炭, 被认为是一种适合应用

于工业锅炉的高品位燃料^[1]。但是, 成型燃料生产需要消耗大量电能, 其燃烧后的烟尘、林格曼黑度、NO_x 等指标仍然难以达到环保要求, 而且成型燃料使用中存在结垢结渣问题需经常停炉清渣。除生物质成型燃料外, 生物质气化燃气已经在发电、农村供热及烘干等方面得到了快速发展^[2,3], 作为锅炉的替代能源已有成功应用^[4], 但规模远不及成型燃料,

* 收稿日期: 2015-02-06 修订日期: 2015-03-16

基金项目: 广东省战略新兴产业技术公关项目 (2012A032300003); 广东省重大科技专项 (2012A080103002); 广东省重大科技专项 (2013B091300001)

† 通信作者: 杜海江, E-mail: duhj88@163.com

主要是因为气化燃气中焦油及其二次污染问题一直无法有效解决。

东莞市百大新能源有限公司自 2006 年涉足生物质能源行业以来,采用焦油随生物质燃气在锅炉炉膛中直接燃烧的技术路线,有效解决了焦油及其二次污染对锅炉生物质能源改造带来的困扰。

1 生物质燃气代煤、油燃烧系统

以生物质气化燃气为锅炉能源的热能转换系统由三部分组成:气化炉、燃烧器、锅炉,系统结构如图 1。以家具厂废弃木材边角料或压块燃料为主的生物质通过料斗间歇方式添加进固定床上吸式气化炉,在气化炉中高温缺氧状态下裂解、氧化还原,生成 CO、H₂、CH₄ 等小分子量可燃气体,在气化过程中需要加入空气等气化剂。气化炉生产的生物质燃气经管道输送到生物质气燃烧器与空气混合并在锅炉炉膛中燃烧,锅炉吸收热量生产高温蒸汽,蒸汽经管网输送给用汽企业。生物质燃气应用于蒸汽锅炉,可以代替煤炭以提供清洁环保的能源、代替油及天然气以提供廉价的能源。

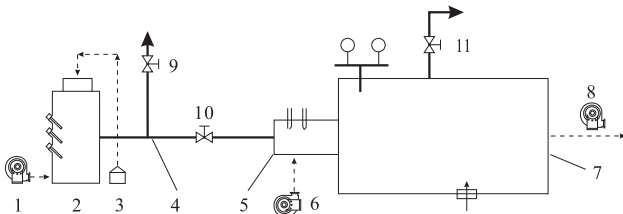


图 1 生物质热能转换一体化系统
Fig. 1 Integrated system of biomass energy thermal conversion

2 改进型固定床上吸式气化炉

2.1 气化炉结构

常规上吸式气化炉是气固逆流工作方式,产出的可燃气体从炉顶部排出,虽具有气化效率高、气化强度大、除灰分以外无其它固体可燃剩余物等优点,但同时存在产出气体中焦油含量相对较多、气体质量相对较差的缺点。而下吸式气化炉是气固顺流工作方式,产出气与灰分从下部排除,气化过程中产生的焦油部分被高温热裂解,因此产出气中焦油含量相对较少,但含有较多灰分。

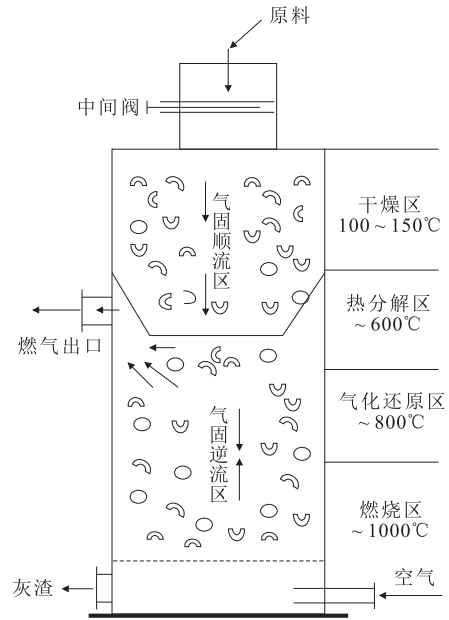


图 2 改进型（中部出气）上吸式气化炉结构图
Fig. 2 Structure of gasifier with gas outlet in the middle position

改进型（中部出气^[5]）固定床上吸式气化炉是交错流工作方式,结构如图 2 所示,具有气固顺流与逆流的优点,干燥层所排出的水分随物料下行时参与气化反应,而经热分解层产生的焦油,在高温状态下呈气态输出。气化炉主体结构以一个锥形的下料裙分成上下两部分,上部为以干燥为主的储料室,下部为以热解、氧化、还原反应为主的气化室。原料从料斗落到炉本体中会因下料裙的原因形成一个自然环状死角空间,这个空间就成了一个自然的“集气走廊”,可燃气体出气口就设在此死角空间处。气化后的可燃气体先聚集在此环形的“集气走廊”中,由“集气走廊”排入出气口。这样的设计不仅大大减少了输出燃气中的飞灰,同时出气口设在干燥层的下部,燃气输出没有经过干燥层,所以输出燃气的温度较高,降低了燃气中焦油成分低温释出的可能性,焦油成分可以随燃气一起在锅炉炉膛中燃烧,焦油热量的利用不仅使系统热转换效率得到提高,也解决了焦油凝聚堵塞而引起的设备运行可靠性问题。此外,当储料室充满原料时,压力差使气体通过料层的阻力大于从出气口导出的阻力,避免了烟气通过进料口外溢的可能性。

2.2 气化炉主要结构参数设计

以 2 T/h 蒸汽锅炉为例,设计的中部出气气化炉需满足供给 2 T/h 蒸汽锅炉输出的热量,即锅炉每小

时输出热量为 1 200 Mcal/h, 锅炉的热效率按国家标准《锅炉节能技术监督管理规程》中的最低设计要求 80% 计算, 可得到锅炉需要输入的最小热量, 亦即气化炉输出的最小热量:

$$Q_1 = \frac{1200}{80\%} \times 100\% = 1500(\text{Mcal/h})$$

气化炉的气化效率指生物质气化后所得燃气热量与气化原料所含热量之比, 固定床上吸式气化炉的气化效率一般在 70% ~ 75% 之间, 在此按 70% 取值, 可得出供给气化炉生物质木料每小时需提供的热量:

$$Q_2 = \frac{1500}{70\%} \times 100\% = 2142.86(\text{Mcal/h})$$

实测收到基生物质木料低热值为 15 680 kJ/kg, 可得出每小时需要供给气化炉生物质木料的重量:

$$W = \frac{2142.86 \times 1000 \times 4.184}{15680} = 571.79(\text{kg/h})$$

气化炉的气化强度, 即单位截面积单位时间内气化的生物质的量, 常规固定床一般为 100 ~ 300 kg/(m²·h), 结合之前炉型的实际经验取 250 kg/(m²·h), 可得出气化炉气化室截面积:

$$S = \frac{571.79}{250} = 2.287(\text{m}^2)$$

因此, 气化室直径 D 计算如下:

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.287}{3.14}} = 1.71(\text{m}) \approx 1.7(\text{m})$$

气化炉壁保温层的厚度为 0.3 m, 因此气化炉外径为 2.3 m。为了保证上吸式气化炉的稳定运行, 炉内各反应层应有合适的高度, 其气化室高径比一般应大于 2, 即 $H > 2D$, 在此取 $H = 2D$, 即气化室总高度 3.4 m。储料室需保证充足的木料烘干, 空间取为料斗 2 倍的体积, 相应高度大约为 1.2 m。

综上, 适应于 2 T/h 蒸汽锅炉的中部出气气化炉设计数据如表 1。适应木料: 块状边长 2 cm 到 10 cm 之间, 枝条状长度小于 30 cm, 水份小于 20%。

表 1 气化炉设计数据

Table 1 Design parameters of gasifier

设计项目	设计数值 (m)
炉体内径 ϕ_1	1.7
炉体外径 ϕ_2	2.3
炉排直径 ϕ_3	1.5
气化室高 H_1	3.4
储料室高 H_2	1.2
炉主体高 H_3	5.5
支架高 H_4	7.5

2.3 改进型气化炉特征分析

改进型的中部出气上吸式气化炉解决了几个关键问题: 第一是从底部经燃烧区、还原区上升的气体经高温热分解区排出炉外, 避免了低温热分解, 减少焦油产量, 提高气体质量; 第二是使气体中水分经干燥区释出后向下流动参加气化反应, 提高产出气热值; 此外产出气中的飞灰大大减少。因此中部出气结构综合了常规上吸式气化炉与下吸式气化炉的优点, 出气口位置即锥形下料裙位置是气化炉设计的关键。在上吸式气化炉中, 反应温度随着反应层高度(料层高度)的增加而降低, 在运行中当其他条件如生产率、空气比等已经确定时, 反应层高度反映了反应温度, 为了获得质量比较高的产出气, 必须控制较高的热分解区温度, 这可以通过控制反应层高度来实现^[6]。通过料层温度测试实验确定出气口位置距离炉栅 1.5 m 附近为最佳, 此时可保证输出燃气温度不低于 300℃, 燃气低位热值不小于 6 MJ/Nm³。

3 生物质燃气代油燃烧应用及热工测定

以中部出气气化炉产出燃气为燃料在蒸汽锅炉中代油燃烧一体化系统结构如图 1。基于此系统建设的企业能源管理中心为周边中小企业提供蒸汽能源, 有效解决了企业的用能问题, 淘汰了原来各厂家自行建设的燃煤、燃油小锅炉。

代油燃烧系统的燃气压力特征是气化炉内为 0.5 kPa 左右微正压, 锅炉炉膛为 0.5 kPa 左右微负压, 因此气化炉产出的可燃气可以在气化炉正压驱动下向锅炉炉膛输送, 而气化炉微正压与锅炉炉膛

微负压是在气化炉鼓风机、燃烧器配风、及锅炉引风机的风量控制下实现的。

锅炉输出蒸汽的应用对象为以食品加工、纺织、酒店等企业为主，蒸汽压力范围一般在 0.3 MPa ~ 1.2 MPa，对应的蒸汽温度为 133℃ ~ 188℃，输出的蒸汽压力允许偏差范围为 1% ~ 3%。输出蒸汽压力的调节是基于控制气化炉鼓风机风量实现的，气化

炉鼓风量直接影响生物质燃气的输出量，进而影响锅炉燃料供给量，系统自适应智能控制原理如图 3^[7]。系统运行的热工测定数据基于现场的实测数据及经现场采样后在实验室的测试数据，现场实际采集样品及数据包括气化炉的空气供应量、供给气化炉的生物质木料及供应量、锅炉燃烧器入口处的生物质燃气、锅炉输出蒸汽量。

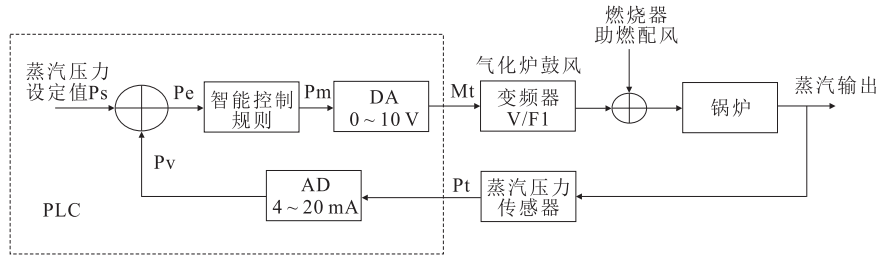


图 3 基于蒸汽压力的气化炉鼓风控制原理图

Fig. 3 Control principle diagram of air supplied to gasifier based on steam pressure

3.1 生物质燃气组分与热值

由 Agilent 7980A 气相色谱仪检测结果统计的生物质燃气组分与热值如表 2。

燃气低热值 Q_{DWJ} 按下式计算[单位: $\text{kJ}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$]:

$$Q_{DWJ} = 107.94H_2 + 126.44CO + 359.06CH_4 + 643.50C_2H_6 + 594.40C_2H_4 + 564.90C_2H_2$$

取 $V_N = 46.71\%$, $Q_{DWJ} = 6\,272.33 \text{ kJ}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$ (表

2)。其中, V_N 为 N_2 的体积百分比, Q_{DWJ} 为输出燃气的低位热值, 燃气样品采样方式为气化炉稳定运行后在燃烧器入口处每隔 10 min 采样一次。

3.2 收到基生物质木料的工业及元素分析

收到基生物质木料来自家具厂生产剩余边角料, 无需经过破碎烘干即可直接投放, 实测数据如表 3 所示。

表 2 燃气组分与热值

Table 2 Biomass gas composition and LHV

样品	组分含量 (V%)									Q_{DWJ} [$\text{kJ}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$]
	H_2	CO	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	O_2	CO_2	N_2	
样品 1	7.76	31.45	2.18	0.16	0.26	0.33	0.23	5.56	48.41	6046.94
样品 2	8.40	31.06	2.43	0.17	0.27	0.36	0.22	5.74	46.26	6177.48
样品 3	9.54	30.61	2.72	0.18	0.31	0.42	0.40	5.90	45.86	6413.76
样品 4	9.71	31.28	2.68	0.18	0.29	0.35	0.19	5.83	46.88	6450.10
样品 5	7.88	31.02	2.31	0.19	0.18	0.36	0.16	7.25	46.88	6033.08
样品 6	9.84	30.20	2.54	0.16	0.17	0.30	0.19	5.83	46.45	6169.49
平均	8.85	31.10	2.50	0.17	0.28	0.37	0.26	5.76	46.71	6272.33

表 3 生物质木料的工业分析及元素分析

Table 3 Proximate and ultimate analysis data of biomass

项目	工业分析 (%)				元素分析 (%)					热值分析 (kJ/kg)		
	V_o	As	Fc	H_2O	C	H	N	S	O	Q_{HW}	Q_{DW}	Q_w
实测数据 (平均)	82.71	1.55	15.78	9.03	47.10	6.19	0.10	0.06	46.05	17 576	16 345	15 680

3.3 焦油的工业分析

生物质气化反应过程中产生的焦油成分较复杂,焦油的存在对气化燃气的利用产生很大影响。通过元素分析可知,生物质焦油主要由C、H、O,及少量的N组成,表4列出实测收到焦油样品的元素分析,表5给出气化燃气每间隔10 min的焦油含量。

表4 焦油的元素分析

Table 4 Elemental analysis of biomass tar

元素	C	H	O	N
含量 (wt%)	59.07	6.60	33.50	0.80

由表5得出单位体积燃气中焦油的平均含量 $\rho_{\text{TAR}} = 32.23 \text{ g}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$ 。经测试,焦油高位发热量为

表6 实测运行数据

Table 6 Operation data of the system

运行时间	空气流量 (m^3/h)	加料量 G_{W} (kg)	设定蒸汽压力 (MPa)	蒸汽产量 (kg)	回水温度 ($^{\circ}\text{C}$)
270 min	470 ~ 490	1 703.70	0.4	8 014	70
每小时平均	480	378.60	0.4	1 781.00	65 ~ 75

4 气化炉运行的热能计算

4.1 燃气产量

气化后的燃气产量以氮平衡法计算,即忽略生物质木料中的氮含量,而气化鼓风中的氮含量与气化所得燃气的氮含量相等,空气氮含量按79%计,由下式可计算出平均燃气产量 (V)。

$$V = \frac{\text{供给空气} \times \text{空气氮含量}}{\text{燃气中的氮含量}} = \frac{480 \times 79\%}{46.71\%} = 811.8 (\text{m}^3/\text{h})$$

折算到标准状态下的燃气产量 (V_0):

$$\begin{aligned} V_0 &= V \times \frac{273.15}{273.15 + T} \times \frac{P}{101.325} \\ &= 811.8 \times \frac{273.15}{273.15 + 25} \times \frac{100910}{101.325} = 740.56 (\text{Nm}^3/\text{h}) \end{aligned}$$

其中, T 是取样时的鼓风温度,为 25°C ; P 为取样时的大气压力, Pa 。

4.2 气化炉输出功率计算

气化炉输出功率由三部分构成:(1)燃气的热功率;(2)燃气中焦油的热功率;(3)燃气及焦油

22 700 kJ/kg,低位发热量 Q_{TAR} 为 20 853 kJ/kg。

表5 焦油在燃气中的含量

Table 5 Tar content in biomass gas

样品	焦油含量 [$\text{g}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$]
样品 1	28.93
样品 2	35.87
样品 3	31.89
平均	32.23

3.4 系统实际运行数据统计

系统稳定运行期间,记录日间正常供汽时段的气化炉加料量、空气供应量、蒸汽产量等数据如表6所示。

的显热功率。

(1) 燃气的燃烧热功率 (P_1):

$$\begin{aligned} P_1 &= V_0 \times Q_{\text{Dwj}} \\ &= \frac{740.56 \times 6272.33}{3600} = 1290.29 (\text{kW}) \end{aligned}$$

其中, G_{Dwj} 为燃气的低位热值。

(2) 焦油的燃烧热 (P_2):

$$\begin{aligned} P_2 &= V_0 \times \rho_{\text{TAR}} \times Q_{\text{TAR}} \\ &= \frac{740.56 \times 32.23 \times 20853}{1000 \times 3600} = 138.26 (\text{kW}) \end{aligned}$$

其中, ρ_{TAR} 为焦油含量, Q_{TAR} 为焦油的低位热值。

(3) 按燃气组分计算的定压比热 C_p (0°C) 为 $1.32 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C})$, C_p (200°C) 为 $1.349 \text{ kJ}/(\text{m}^3\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

燃气显热 (P_{31}) 为:

$$P_{31} = V_0 \times C_p \times T = \frac{740.56 \times 1.349 \times 200}{3600} = 55.50 (\text{kW})$$

$T^{\circ}\text{C}$ 时焦油的比热为: $C_p_{\text{焦油}}(T^{\circ}\text{C}) = 1.73 + 0.0025T$, 由此算得 $C_p_{\text{焦油}}(200^{\circ}\text{C}) = 2.23 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

焦油显热 (P_{32}) 为:

$$P_{32} = V_0 \times \rho_{TAR} \times C_p \times t \\ = \frac{740.56 \times 32.23 \times 2.23 \times 200}{1000 \times 3600} = 2.96(\text{kW})$$

总显热 (P_3) 为:

$$P_3 = P_{31} + P_{32} = 55.50 + 2.96 = 58.46(\text{kW})$$

(4) 气化炉输出总功率 (Q):

$$Q = P_1 + P_2 + P_3 \\ = 1290.29 + 138.26 + 58.46 = 1487.01(\text{kW})$$

(5) 气化炉总热量转换率 η_0 , 即气化炉每小时输出的总热量与气化炉消耗木料所含热量之比:

$$\eta_0 = \frac{Q}{G_w \times Q_{DW}} = \frac{1487.01 \times 3600}{378.6 \times 16345} \times 100\% = 86.51\%$$

其中, G_w 为每小时供给气化炉的生物质木料量, Q_{DW} 为生物质木料干基低热值。

4.3 气化效率 (η)

冷气体的气化效率由下式计算:

$$\eta = \frac{V_0 \times Q_{DWJ}}{G_w \times Q_{DW}} = \frac{740.56 \times 6272.33}{378.6 \times 16345} \times 100\% = 75.06\%$$

4.4 气化炉锅炉一体化系统的总热效率

由表 6 数据可得单位质量木料的蒸汽产量 G_{STM} $= \frac{1781.00}{378.60} = 4.70$ (kg)。每千克蒸汽在 0.4 MPa (温度为 151.85℃) 下的焓为 2 748.5 kJ, 锅炉平均回水温度 70℃, 热焓 290 kJ/kg, 每千克蒸汽实际获得的热焓 $H_{STM} = 2 748.5 - 290 = 2 458.50$ (kJ/kg)。因此系统总热效率为:

$$\eta_{\text{总}} = \frac{G_{STM} \times H_{STM}}{Q_w} = \frac{4.7 \times 2458.50}{15680} \times 100\% = 73.7\%$$

其中, Q_w 为收到基生物质木料低热值。

4.5 焦油及燃气显热的热效率

焦油及燃气显热热效率由下式计算:

$$\eta_1 = \frac{P_2 + P_3}{Q} = \frac{138.26 + 58.46}{1487.01} \times 100\% = 13.23\%$$

4.6 运行结果分析

气化炉所生产的可燃气体基本都为表 2 所列的组分, 不同的废木料生产气体组分有略微差别, 但变化不大, 主要以 H_2 、 N_2 、 CH_4 、 CO 和 CO_2 等为主, 其中可燃气体主要为 H_2 、 CH_4 、 CO 和少量的 C_2H_2 、 C_2H_4 和 C_2H_6 等, 燃气的低热值都在 6 MJ/(N·m³) 以上。焦油和气体显热占气化炉输出总热功率的 13.23%, 这部分热量的利用, 正是焦油成分随可燃气体直接燃烧提高系统热效率的主要原因。气化炉采用中部出气结构使原料在干燥区释出的水分向下流动, 经高温热分解区参加气化反应, 提高产出气热值, 与常规上吸式气化炉相比^[8], 燃气中 CO_2 组分明显减少, 而 CO 组分显著增加, 燃气热值从 5 MJ 提高到 6 MJ 以上, 冷气体气化效率达到 75.06%, 含焦油及气体显热的气化炉热效率达 86.51%, 生物质燃气代油燃烧一体化系统的总热转换效率为 73.7%。

5 锅炉排放及系统经济效益分析

5.1 锅炉尾气排放

生物质燃气燃烧后 SO_2 、 NO_x 和灰分排放量比化石燃料要小得多, 实测数据如表 7, 均显著低于《大气污染物排放限值》(DB44/27-2001) 第 1 时段二级标准规定的指标, 无需对锅炉尾气治理即可直接排放^[9]。

表 7 锅炉尾气排放数据

Table 7 Emission data of boiler

	SO_2 (mg/m ³)	NO_x (mg/m ³)	烟尘 (mg/m ³)	黑度级
样品 1	27.00	33.30	5.40	-
样品 2	29.30	31.80	6.72	0.5
样品 3	32.10	35.70	6.93	-
执行标准*	≤100	≤400	≤50	≤1

*《大气污染物排放限值》(DB44/27-2001) 第 1 时段二级标准。

5.2 经济效益分析

本系统在东莞市某五星级酒店的实际应用证明其经济效益显著, 该酒店每天用蒸汽 24 t, 改造前锅炉以重油为燃料, 改造后用生物质燃气为燃料, 只要 3 ~ 3.5 t 废木料气化产生的生物质燃气的能量与 1 t 重油所产生的能量相当, 参照目前的市场价格, 3 t 废木料只需 1 500 元左右, 而 1 t 重油却要 3 500 元, 原料成本节省 57%。

6 结 论

目前针对蒸汽锅炉的生物质能源改造仍以生物质成型燃料为主，燃烧成型燃料如烟气的处理不当，PM2.5 超标排放将影响空气环境，因此广东珠三角地区在大面积推广生物质成型燃料几年后已不再审批新增项目。中部出气的上吸式气化炉及生物质气化燃气在蒸汽锅炉中替代煤、油或天然气应用具有成本、环保、政策方面的绝对优势，可以有效解决中小企业的用能问题，达到节能减排的目的，如有效解决焦油二次污染问题，其逐渐走向规模化应用只是时间问题。

符号表：

Q_{Dwj} 燃气的低位热值， $\text{kJ}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$ ；
 Q_{HW} 燃气的高位热值， $\text{kJ}/(\text{N}\cdot\text{m}^3)$ ；
 Q_{DW} 生物质木料干基低热值， kJ/kg ；
 Q_w 收到基生物质低热值， kJ/kg ；
 ρ_{TAR} 单位体积燃气中焦油的含量，%；
 Q_{TAR} 焦油热值， kJ/kg ；
 V_{GAS} 每小时气化炉鼓风量， m^3 ；
 G_w 每小时供给气化炉的生物质木料量， kg ；
 G_{STM} 每小时锅炉的蒸汽产量， kg ；
 H_{STM} 每千克蒸汽获得的热焓， kJ/kg ；
 Vo 挥发分（生物质工业分析），%；
 As 灰分（生物质工业分析），%；

Fc 固定碳（生物质工业分析），%；

H_2O 生物质水分，%。

参考文献：

- [1] 杨帅, 杨树斌, 甘云华, 等. 生物质成型燃料热解特性及动力学研究[J]. 节能技术, 2010, 28(161): 199-205.
- [2] 熊昌国, 虞洪章, 张芸. 生物质燃气烘干粮食的试验和应用研究[J]. 四川农机, 2005(2): 28-30.
- [3] 王建安, 刘国顺. 生物质燃烧锅炉热水集中供热烤烟设备的研制及效果分析[J]. 中国烟草学报, 2012, 18(6): 32-37.
- [4] 梁先林. 生物质燃气替代燃油改造在锅炉中的运用[J]. 广东化工, 2013, 40(251): 89-90.
- [5] 杜海江, 徐冰嫵, 李宗楠, 等. 中部出气的上吸式固定床气化炉及其自动控制的料斗供料系统设计[J]. 应用能源技术, 2015(1): 23-28.
- [6] 徐冰嫵, 罗曾凡, 陈小旺, 等. 上吸式气化炉的设计与运行[J]. 太阳能学报, 1988, 9(4): 358-368.
- [7] 杜海江, 徐冰嫵, 李宗楠, 等. 基于锅炉出口蒸汽压力的生物质气化热能转换一体化系统的自适应智能控制[J]. 新能源进展, 2014, 2(2): 104-110.
- [8] 刘国喜, 庄新姝. 生物质气化炉[J]. 农村能源, 1999, 88(6): 17-19.
- [9] 陆长清, 刘光华. 秸秆生物质在上吸式固定床气化炉中的气化特性分析[J]. 江西科学, 2013, 31(5): 647-650.

作者简介：

杜海江（1964-），男，高级工程师，从事电子产品设计研发及工业自动化工程应用工作。