

文章编号: 1000-5862(2017)05-0441-06

生物质成型燃料热解气化在锅炉中的应用研究

简弃非 魏炫坤

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广东 广州 510640)

摘要: 研究了供热锅炉专用的生物质成型燃料3室热解气化炉运行和输出功率特性。3室气化炉底部进气炉排设置有左、中、右3个不同方向的气流通道,气化剂经过炉排喷向燃料时形成3向进风,对燃料形成扰动避免堆积。以空气-水蒸气(体积比7:3)为气化剂,热解可燃气中的氢气含量较空气气化方式得到了提升,对试验用6t供热锅炉系统采用SNCR进行NO_x脱除,喷入质量分数为15%的尿素溶液,NO_x脱除效率达85%,排放烟气中NO_x含量114 mg·m⁻³,满足排放要求。

关键词: 生物质成型燃料; 热解气化; 3向进风; SNCR; NO_x脱除

中图分类号: TK 6 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2017.05.01

0 引言

生物质热解气化是一种合理利用生物质能源的有效方法,从热解气化炉的研究现状来看,改进气化炉的结构和气化工艺,提高产气热值与清洁度,一直是国内外关注的焦点^[1-4]。

传统生物质热解气化炉,例如上吸式气化炉在气化生成气中直接混入挥发分中析出的焦油,使产气中焦油含量较高。下吸式气化炉较上吸式产生的焦油含量低,但炉内微负压设计导致连续排灰困难,难以保证气化过程的稳定,且炉排处于高温区,熔融的灰渣粘连在炉排上对炉排的寿命有较大影响^[5-6]。

本文对蒸气产量为6 t·h⁻¹的供热锅炉及配套的3室结构生物质成型燃料热解气化炉进行分析研究,该3室热解气化炉具有容量大(可匹配8 t锅炉的需求)、效率高等特点。由于生物质燃料中只有很少量的硫,气化炉热解气化产生的可燃气在送入锅炉炉膛内燃烧后,几乎不存在硫氧化物,烟气经布袋除尘,颗粒物的含量非常少,故主要考虑烟气中氮氧化物NO_x的脱除。

1 生物质成型燃料热解气化

生物质燃料的热解气化通常以空气、水蒸气为

气化剂,通过热化学反应(热解、氧化、还原等反应)将生物质燃料转化为可燃气体的过程^[5]。堆积密度对生物质燃料的热解气化过程有很大影响^[7-9],未成型的生物质燃料由于本身的密度小,在热解气化过程中挥发分迅速析出,难以形成稳定的物料反应层。生物质成型燃料经高压形成,其密度远大于原生物质,挥发分的溢出速度与传热速度均有所降低,易形成稳定的气化层,有利于热解气化过程的完全进行。

当以空气为气化剂时,由于N₂不参与热解气化,使产气中含有50%左右的N₂,对产气热值造成影响。产气热值约为5 MJ·m⁻³^[8]。3室热解气化炉气化过程中加入一部分水蒸气,体积比例为空气70%、水蒸气30%。水蒸气在气化过程中可以释放出部分氧气,减少了空气消耗量,一定程度上减少N₂所占的比例,同时水蒸气与生物质反应,提高了产气中氢气含量。水蒸气进入热解气化室中处于悬浮状态的成型燃料之间,有助于热解气化产生的细小颗粒物黏结成较大颗粒物,可减少进入炉膛燃烧的颗粒物含量。

2 热解气化炉的结构

3室热解气化炉的进料室、热解气化室、热解气与2次风混合室按功能不同分别布置在3个区域。

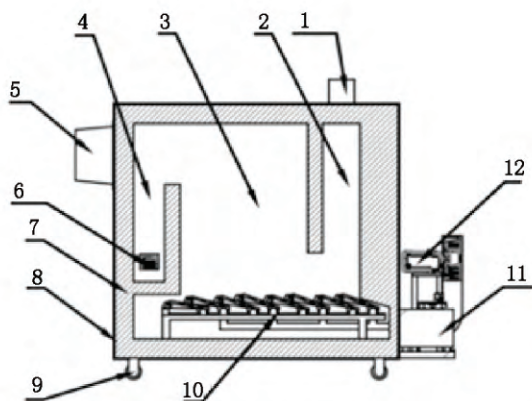
收稿日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(21776095)和广州市2017年产学研协同创新重大专项(201604016090)资助项目。

作者简介: 简弃非(1963-),男,湖南邵阳人,教授,博士生导师,主要从事动力机械、新能源等方向的研究。E-mail: tejqf@suct.edu.cn

图 1 为 3 室生物质气化炉的结构及外观示意图,图 1(a) 为 3 室热解气化炉剖面图,图 1(b) 为热解气化炉及配套锅炉照片. 3 室热解气化炉的进料、热解气

化、产气过程是在一个联通空间内进行,提升了气化效率. 输出的可燃气与旋流 2 次风混合提高了燃料热效率.



(a) 3 室热解气化炉剖面图



(b) 热解气化炉及配套锅炉系统外观

1. 进料口; 2. 进料室; 3. 热解气化室; 4. 混合室; 5. 烧嘴; 6. 2 次风进口; 7. 保温砖; 8. 钢结构骨架; 9. 壳体底部滚轮; 10. 活动炉排; 11. 动力模块和控制模块; 12. 1 次送风模块.

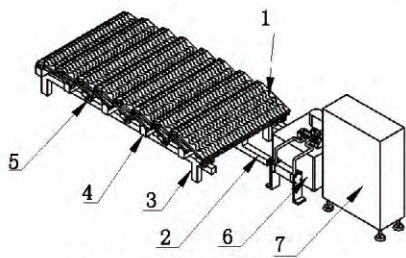
图 1 3 室热解气化炉和匹配锅炉示意图

热解气化室下部为进行往复运动的活动炉排, 气化炉外连接有 1 次送风模块、2 次送风模块、动力与控制模块. 进料室和气化室的下部连通, 热解气化室和混合室的上部连通, 实现 3 室依次连通. 其中, 进料室下部的炉排间隙为 1 次风进口, 气化炉上侧方接有燃烧器.

生物质热解气化炉的炉排大小、结构直接影响燃料的热解气化效率. 热解气化室的活动炉排由动炉排和定炉排以及推杆、炉排架构成(如图 2 所示). 定、动炉排座均安装在炉排架上, 推杆一端与

多个动炉排座连接, 炉排架固定在气化炉壳体内部的底部. 定炉排和动炉排均由炉排片组成, 炉排片按照位置分为左单炉排片、中间炉排片和右单炉排片. 组合不同数量的炉排片, 可满足不同热负荷蒸气锅炉的可燃气用量.

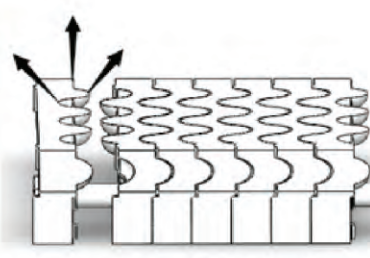
炉排片上有球状凸台和凹槽, 配合形成圆弧状风道, 使气化剂由炉排间隙进入热解气化室, 形成左斜进风、右斜进风、垂直进风 3 种进风方式. 3 向气流的扰动, 避免了生物质燃料的堆积.



(a) 3 室气化炉炉排结构示意图



(b) 炉排实物图



(c) 3 向气流示意图

1. 炉排 2. 推杆 3. 炉排架 4. 定炉排座 5. 动炉排座 6. 动力模块 7. 控制模块.

图 2 活动炉排结构及实物

3 热解气化炉的运行特性

热解气化炉的运行过程中成型燃料由螺旋送料送入, 下落至活动炉排, 炉排在动力模块控制下由推杆推动炉排向前移动, 燃料在炉排推动作用下, 由

进料室进入热解气化室, 气化剂从炉排间隙的风道中吹出, 使燃料在该室热解气化. 热解气化后的生物质燃料灰渣, 同样在活动炉排的推动作用下进入排灰区域. 在推杆作用下炉排进行往复运动, 将新的生物质燃料送入热解气化室, 同时将生物质热解气化后的灰渣向排灰区域推移(如图 3 所示).

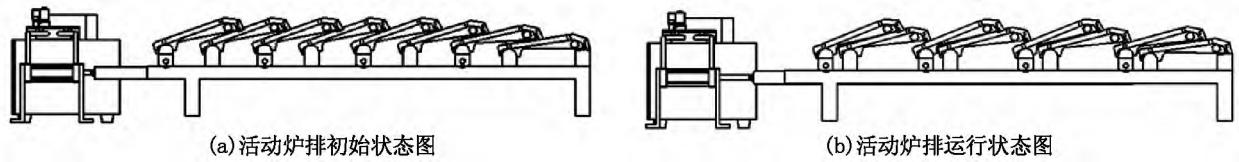


图 3 活动炉排状态图

不同种类的生物质燃料挥发分析出速度不同^[10]。如果炉排往复速度过快,在燃料没有充分热解气化的情况下,就被炉排推至排灰区域,造成浪费;另一方面,若炉排往复速度过慢,易使成型燃料热解气化完全后形成的灰渣在炉排上堆积,影响气化炉的运行。如图 4 所示,分别为热解气化充分的燃

料灰渣(见图 4(a))和未完全热解气化的燃料灰渣(见图 4(b))。当炉排运动速度过快时,燃料仅析出挥发分后(灰渣中含有较多焦炭)就被推至排灰区域。因此可根据不同种类的生物质燃料调整活动炉排的往复运动频率,实现成型燃料的高效利用。

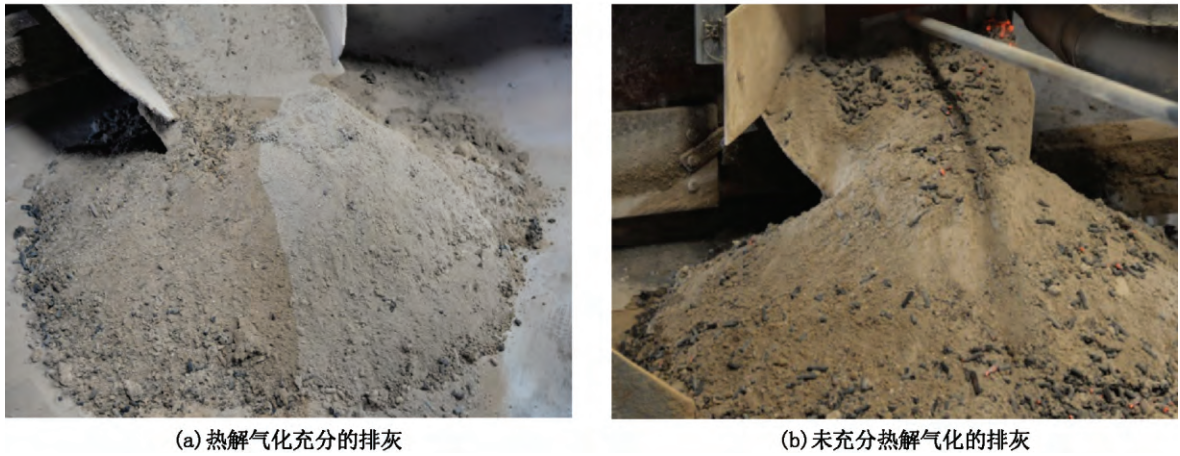


图 4 热解气化炉排灰

进入气化炉中间气化室炉排上方的生物质成型燃料厚度对热解气化有较大影响,文献[11]的研究表明:当原料层厚度过低时,可燃气产气速度变得缓慢,合理的料层厚度能够使产气速度加快。而 3 室热解气化炉的运行也表明:在热解气化室内,成型燃料料层厚度保持在 400 ~ 500 mm,与文献[11]中的数据相吻合。

成型燃料在热解气化室内于 300 ℃ ~ 500 ℃ 条件下发生热解反应,挥发分析出,随后热解产气以及焦炭与气化剂发生反应^[12],反应释放出大量热以维

持燃料干燥、热解及后续反应。气化剂由高压头(>7 kPa)输送,从炉排间隙进入热解气化室。生物质燃料在热解气化后产生的可燃气与 2 次风在旋流燃烧器中混合燃烧,使燃气燃烧更加充分,减少热力型 NO_x 生成。

4 热解气化炉输出功率

热解气化炉运行中使用的 2 种生物质燃料工业元素分析如表 1 所示

表 1 2 种生物质燃料元素分析									%
	M _{ar}	V _{ar}	Ash _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	LHV/(MJ·kg ⁻¹)
成型燃料 1	9.10	73.38	1.36	44.37	5.78	38.29	1.05	0.05	16.51
成型燃料 2	6.57	78.49	1.53	46.02	6.03	40.07	0.69	0.15	16.77

标况下 1 kg 燃料在完全燃烧时所需理论空气量为

$$V^0 = 0.088\,9(C_{ar} + 0.375S_{ar}) + 0.265H_{ar} - 0.033\,3O_{ar},$$

生物质燃料气化所需空气量为

$$V_L = \alpha V^0,$$

其中 V_L 为气化所需空气量($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$), α 为气化当量比。在当量比为 0.25,生物质燃料进料量为 $1\,174\,\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,计算所得气化所需风量为 $1\,235\,\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,与 3 室热解气化炉的气化剂流量 $1\,280\,\text{m}^3 \cdot$

h^{-1} 相符合, 这表明在实际运行中气化剂流量有利于热解气化的进行.

气化过程中加入水蒸气, 会使气化温度逐步降低^[9], 因此要有相应的空气为其反应提供热量以维持气化温度的稳定. 综合考虑, 通入 3 室热解气化炉的气化剂以体积比例计, 组分为空气 70%、水蒸气 30%, 此时 S/B (水蒸气与生物质燃料质量比) 值约为 0.3. 气化生成气组分为表 2 所示. 气化产气的低位热值 LHV 简化计算公式为^[7-8]

$$LHV = 126\varphi_{\text{CO}} + 108\varphi_{\text{H}_2} + 359\varphi_{\text{CH}_4} + 665\varphi_{\text{C}_n\text{H}_m}.$$

由表 2 可得, 水蒸气的加入使氢气含量对比空气气化(氢气含量一般为 10%)^[8-9] 得到提高, 且热值得到一定提升.

由热力计算可得, $1\text{ t } 20\text{ }^\circ\text{C}$ 的饱和水加热为 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 的饱和蒸气, 所需热量约为 $2\,671.8\text{ MJ}$.

由表 3 测试结果得出, 3 室热解气化炉的输出功率满足蒸气产量为 $6\text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$ 蒸气锅炉的要求.

表 2 可燃气体组分

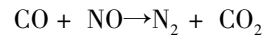
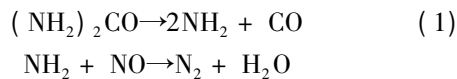
	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	C _n H _m	N ₂	LHV(MJ · kg ⁻¹)
成型燃料 1	14.9	20.8	2.1	19.7	1	41.5	5 542.7
成型燃料 2	14.8	21.1	1.5	18.1	0.8	43.7	5 214.1

表 3 3 室生物质热解气化炉输出功率测试

	最大燃料 流量/(kg · h ⁻¹)	最大输出 热功率/kW	燃烧室 压力	最小燃料 流量/(kg · h ⁻¹)	最小输出 热功率/kW	燃烧室 压力
成型燃料 1	1 160	5 563	-190	350	1 678	-20
成型燃料 2	1 174	5 474	-130	458.6	2 138	-578

5 采用 SNCR 对锅炉烟气中的 NO_x 脱除试验

生物质燃料中硫的含量很少, 气化产气送入锅炉炉膛内燃烧后, 烟气经除尘后几乎不存在硫氧化物, 故主要考虑烟气中 NO_x 脱除. 3 室热解气化炉配套的锅炉采用 SNCR 进行 NO_x 脱除, SNCR 是将 NH₃、尿素等还原剂直接喷入炉膛内与 NO_x 进行如下反应^[13-16]:



还原剂喷入炉膛温度为 $850\text{ }^\circ\text{C} \sim 1\,100\text{ }^\circ\text{C}$ 的区域, 与烟气中的 NO_x 反应生成 N₂ 和水. 在选择性非催化还原方法中, 尿素和液氨均可作为还原剂进行 NO_x 脱除, 但尿素在运输和储存安全等方面更具有优点, 因此选择配制尿素溶液进行 NO_x 脱除.

锅炉产生的烟气由 Testo340 烟气分析仪(见图 5) 进行在线数据检测. Testo340 可直接测量 NO_x, 精度为 $\pm 5\%$, 分辨率达到 0.1 ppm , 符合 2004/108/EEC 标准. 喷枪的作用在于, 将尿素溶液通过喷枪雾化成小颗粒, 喷入炉膛内的脱硝反应区与 NO_x 进行反应.



(a) Testo340 烟气分析仪



(b) 喷枪插入炉膛

图 5 试验器材

通入尿素溶液之前, 烟气中氮氧化物体积浓度为 $848\text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. 分别配制质量分数为 5%、10%、

15% 的尿素溶液, 由喷枪(如图 5(b)) 以 0.5 MPa 的压力下喷入炉膛内, 记录随时间变化的 NO_x 含量

变化,得出图6烟气中 NO_x 的下降曲线。

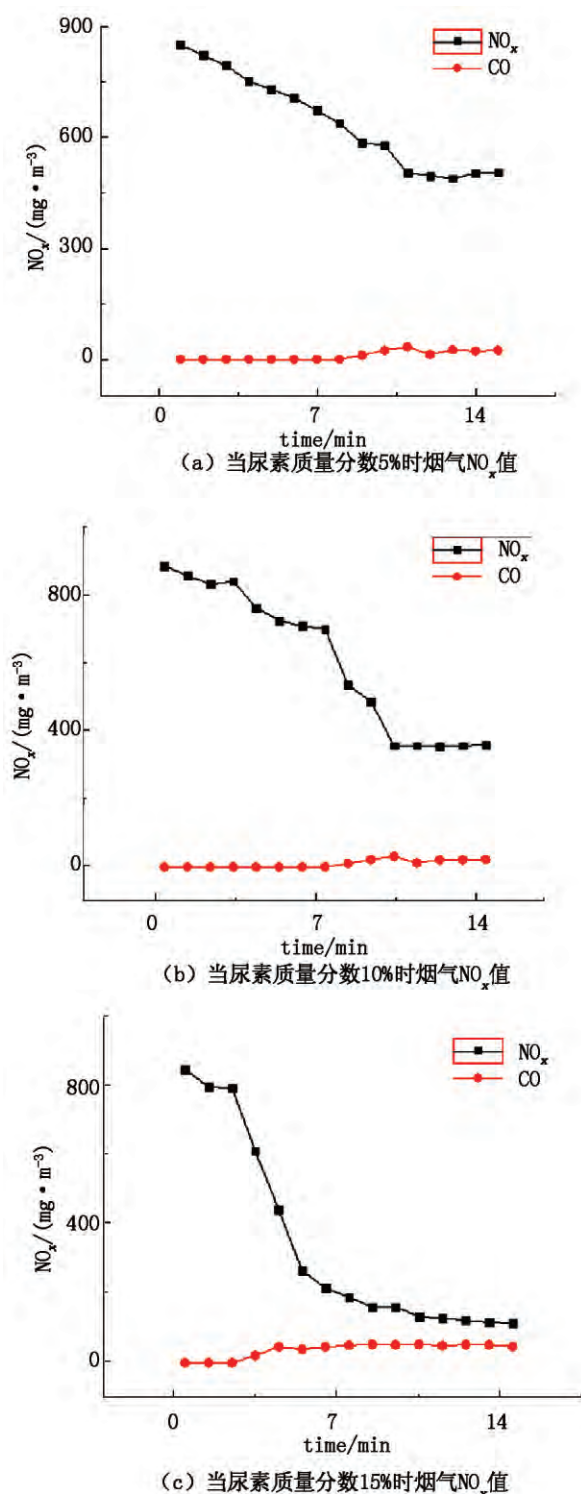


图6 尿素溶液脱硝后的烟气 NO_x 值

由图6得出,当喷入质量分数为5%的尿素溶液时,烟气中 NO_x 含量由 $851 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降至 $506 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,脱硝效率为40.5%;而当尿素溶液中的尿素质量分数为10%时,烟气中 NO_x 含量进一步下降至 $359.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,脱硝效率提高至56.9%;最后

当加入质量分数为15%的尿素溶液时,由图6中数据得出脱硝效率达到85%,烟气中 NO_x 含量下降至 $114 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,低于锅炉排污要求水平($< 200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。脱硝效率的提升可以认为是:随着喷入的尿素溶液含量的增加,SNCR反应平衡向着正反应方向进行,从而提高了脱硝效率,而伴随着 NO_x 的减少,生成了少量的CO,产生原因如反应(1)所示,尿素的分解产生了部分CO。

6 结论

3室热解气化炉中新型活动炉排通过控制不同的往复运动速度,实现不同种类的生物质燃料的充分热解气化,并可通过组合不同数量的炉排片,满足不同热负荷下的燃料热解气化强度。带有凸台和凹槽的炉排片配合形成的流道结构,使气化剂从炉排间隙进入热解气化室时,形成左、右、垂直3种进风方式,避免了生物质燃料在炉排上的堆积。热功率测试结果也表明,3室气化炉的热解气化产气完全能够满足配套锅炉的热负荷需求。锅炉系统采用SNCR方法进行烟气中的 NO_x 脱除,当配制质量分数为15%的尿素溶液喷入炉膛时,脱硝效率达到85%,测得烟气中 NO_x 含量最低达到 $114 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,满足了锅炉排污国家标准(低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)^[17],为后期锅炉系统加装脱硝装置提供了应用参考。

7 参考文献

- [1] 詹昊,苏德仁.生物质气化技术锅炉供热的工业化应用特性[J].新能源进展,2015,3(4):270-279.
- [2] Chen Xu, Chen Yingquan, Yang Haiping, et al. Fast pyrolysis of cotton stalk biomass using calcium oxide[J]. Bioresource Technology, 2017, 233: 15-20.
- [3] Luo Guanqun, Devin S C, Luiz C A A, et al. Pyrolysis of whole wood chips and rods in a novel ablative reactor[J]. Fuel, 2017, 194: 229-238.
- [4] Xiao Yahui, Xu Shaoping, Song Yangbo, et al. Biomass steam gasification for hydrogen-rich gas production in a decoupled dual loop gasification system[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 165: 54-61.
- [5] 刘鑫.新型生物质气化炉的设计与试验研究[D].安徽:合肥工业大学,2012:1-65.
- [6] 李瑞容,朱德文,张连发.生物质下吸式气化炉热解气化试验研究[J].热能动力工程,2015,30(6):936-940.
- [7] Cristina Ap Vilas, Diego Mauricio Yepes Maya, Lora E E

- S et al. Experimental study on biomass gasification in a two-stage downdraft reactor by using mixtures of air ,saturated steam and oxygen as gasifying agents [J]. Energy Conversion and Management 2017 ,145:314-323.
- [8] 朱锡锋. 生物质热解原理与技术 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社 2006.
- [9] 张剑波. 生物质成型燃料固定床热解气化研究 [D]. 杭州: 浙江大学能源工程系 2013:1-84.
- [10] 孙毅 张文标 林启晨. 6 种生物质颗粒成型燃料性能测试分析 [J]. 浙江林业科技 2015 ,35(6):16-22.
- [11] 陈启朋. 生物质固体燃料成型及其气化性能研究 [D]. 五邑: 五邑大学 2011:1-61.
- [12] 杨帅 杨树斌 甘云华. 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):199-201.
- [13] 原奇鑫 孙保民. 选择性非催化还原烟气脱硝反应影响因素实验分析 [J]. 热力发电 2017 ,46(4):51-56.
- [14] 路涛 贾双燕 李晓芸. 关于烟气脱硝的 SNCR 工艺及其技术经济分析 [J]. 现代电力 2004 ,21(1):17-22.
- [15] Sabino De Gisi ,Agnese Chiarelli ,Luca Tagliente ,et al. Energy ,environmental and operation aspects of a SRF-fired fluidized bed waste-to-energy plant [J]. Waste Management 2017(4):1-16.
- [16] Chen Hui ,Chen Dezhen. SNCR De-NO_x within a moderate temperature range using urea-spiked hydrazine hydrate as reductant [J]. Chemosphere 2016 ,161:208-218.
- [17] 环境保护部. 国家质量监督检验检疫总局. GB 13271-2001 锅炉大气污染物排放标准 [S]. 北京: 中国环境科学出版社 2014.

The Application of Biomass Molding Fuel Pyrolysis Gasification in Boiler

JIAN Qifei ,WEI Xuankun

(College of Mechanical and Automobile Engineering ,South China University of Technology ,Guangzhou Guangdong 510640 ,China)

Abstract: The pyrolysis gasifier studied have special structure of the grate which formed a gap that have three directions of the flow passage ,when through the grate gap ,the gasifying agent is divided into left ,medium and right three direction inlet air. Air-vapor is used as gasifying agent in this gasifier ,with 70% of air and 30% of steam ,the hydrogen content of the product increased. The industrial boiler heating system with a capacity of $6\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ used for the test using SNCR method for denitrification ,when injected into the urea solution with mass fraction of 15% ,the denitrification efficiency can reach 85% ,the NO_x content in the flue gas is reduced to $114\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,this value satisfy the national emission requirements.

Key words: biomass molding fuel; pyrolysis gasification; three direction inlet air; SNCR; NO_x denitrification

(责任编辑: 王金莲)