

循环流化床中木屑与煤混烧特性的试验研究

唐秀能, 卢啸风, 鲁佳易

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要: 在自行研制的炉膛尺寸为 150 mm × 150 mm × 2 500 mm 的小型循环流化床上进行木屑与煤的混烧试验, 研究其燃烧特性及污染物排放特性。结果表明: 木屑与煤质量比为 1:3、1:5 和 1:7 的混合物能在循环流化床中稳定燃烧; 随着木屑混合比例的增加, 燃烧高温区往上移动, 炉膛温度分布曲线呈“抛物线”型; 随密相区温度升高, NO_x 体积分数增加。在相同流化风速下, 随木屑混合比例增加, CO 体积分数增大, SO₂、NO_x 体积分数则降低。

关 键 词: 循环流化床; 木屑与煤; 混烧

中图分类号: TK61 文献标识码: A

引 言

木屑作为生物质的典型代表, 被认为是最具有应用潜能的生物质燃料, 国外对其研究较早, 部分国家已实现工业化应用。美国在上世纪 80 年代末就开发出燃烧废木料的大型循环流化床锅炉, 分别安装在弗雷斯诺、洛克林和麦加^[1]。瑞典也将废弃木材作为循环流化床锅炉的重要燃料, 即使在木屑含水率高达 50% ~ 60% 的情况下, 锅炉的效率仍能达到 80% 以上^[2]。我国每年废弃木材的产量高达 8 000 万 m³ 左右, 对其回收利用成为一个重要的研究课题。由于废弃木材分布很不集中, 不适宜大规模的将其用于燃烧发电, 而且单独燃烧时, 效率不高^[3-4], 于是混烧成为处理废弃木材的一种有效手段。循环流化床燃烧技术以其燃烧效率高、污染物排放少、燃料适应性广、负荷调节范围大等优点, 得到世界各国的推广应用^[5]。目前, 埃及米尼亚大学、泰国国立法政大学、英属哥伦比亚大学、希腊克里特理工大学等以及国内的浙江大学热能工程研究所、清华大学、山东电力研究院等对木屑进行相关研究^[6-17], 研究重点主要集中在气化、高温热解、单独

燃烧以及混烧的灰分、碱性物质等方面, 混烧方面研究较少, 特别是对其燃烧特性及污染物排放特性的研究则鲜有报道。

基于此, 搭建一个小型循环流化床热态试验台, 通过木屑与煤按质量比 1:3、1:5 和 1:7 在循环流化床中混烧, 研究其燃烧特性及污染物排放特性, 旨在为农村、城市废弃木材的燃烧应用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验台及系统

试验在自行研制的小型多功能循环流化床试验台上进行, 试验系统由炉膛本体、给料系统、送风系统、电加热点火系统、水冷系统、测量系统组成, 如图 1 所示。炉膛采用碳化硅制作, 截面尺寸为 150 mm × 150 mm, 炉膛高度为 2 500 mm。高温旋风分离器采用不锈钢制作。为便于观察流化情况, 在立管中部安装一段耐高温的石英玻璃管。采用 U 型回料阀, 尺寸为 150 mm × 75 mm × 65 mm。烟道安装蛇形水冷管以降低排烟温度。

1.2 煤、木屑的特性

试验用煤来自某电厂的燃用煤, 经过筛分粒径小于 2 mm。木屑来自重庆某木材加工厂, 粒径小于 1 mm。煤与木屑元素分析及工业分析如表 1 所示。

表 1 煤与木屑的工业分析及元素分析

Tab. 1 Industrial and elemental analysis of coal and sawdust

物料	工业分析/%				元素分析/%				
	M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}	C _{daf}	H _{daf}	N _{daf}	O _{daf}	S _{daf}
煤	8.84	11.82	24.22	55.12	81.43	4.29	1.46	11.54	1.28
木屑	1.59	86.50	3.81	8.10	43.60	5.61	0.21	40.25	0.03

收稿日期: 2011-10-08

基金项目: 重庆市科技攻关资助项目(CSTC. 2011. BA4068)

作者简介: 唐秀能(1986-) 男, 广西都安人, 重庆大学硕士研究生。

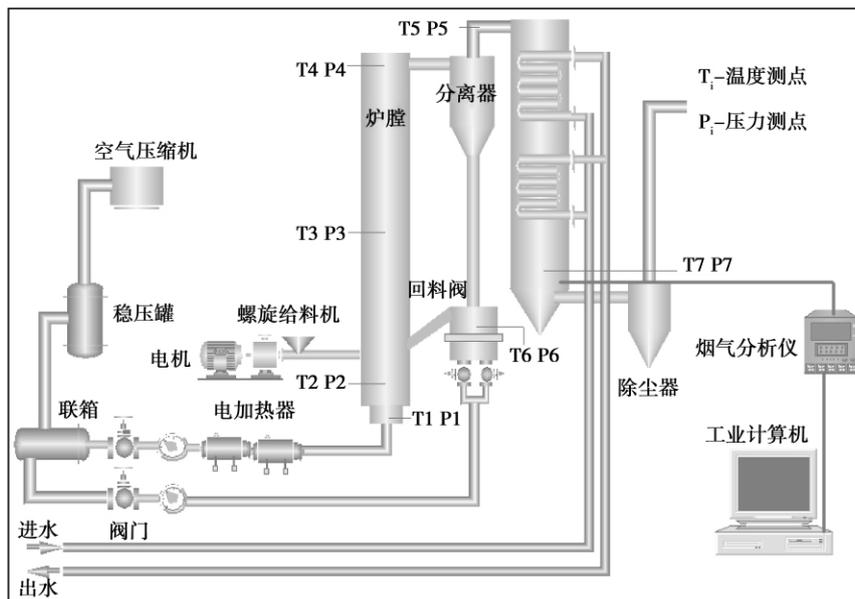


图 1 循环流化床试验系统

Fig. 1 Circulating fluidized bed test system

床料采用经过筛分的循环流化床锅炉循环灰, 颗粒(真实)密度为 $2\ 620\ \text{kg}/\text{m}^3$, 堆积密度为 $1\ 310\ \text{kg}/\text{m}^3$, 对床料进行了筛分, 得出了粒径的筛上曲线和筛下曲线, 其累积粒径分布如图 2 所示, 颗粒平均粒径为 $0.26\ \text{mm}$, 属于 B 类粒子, 具有很好流化性能, 在流化风速达到临界流化风速后即发生鼓泡现象。

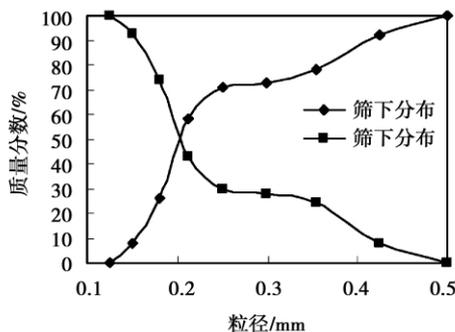


图 2 床料累积粒径分布图

Fig. 2 Chart showing the distribution of cumulative particle diameters of bed material

1.3 测点布置及试验工况

试验台压力及温度测点布置位置如图 1 所示。采用 MCGS 系统采集温度及压力数据, 并在电脑上实时显示, 烟气成分则通过烟气分析仪实时记录。试验所涉及各工况如表 2 所示, 其中每种给料量对应四种不同流化风速。

表 2 试验工况

Tab. 2 Test operating conditions

燃料	给料量/ $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$			流化风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			
煤	8	10	12	0.74	0.86	0.98	1.1
木屑:煤(1:3)	8	10	12	0.74	0.86	0.98	1.1
木屑:煤(1:5)	8	10	12	0.74	0.86	0.98	1.1
木屑:煤(1:7)	8	10	12	0.74	0.86	0.98	1.1

2 试验结果及分析

2.1 流化特性试验

流化特性试验主要确定临界流化风速和快速床临界流化风速。图 3 为冷态床层总压降及热态炉膛上部压降与流化风速的关系。从图中可以得出, 冷态时, 临界流化风速为 $0.16\ \text{m}/\text{s}$; 当流化风速大约为 $1.4\ \text{m}/\text{s}$ 时, 试验观察到床层总压降下降, 同时炉膛上部压差增大, 表明流化风速超过 $1.4\ \text{m}/\text{s}$ 后, 炉内进入快速床状态。热态($900\ ^\circ\text{C}$) 时, 由于气体物性参数的变化, 临界流化风速随温度升高而降低, 大约只相当于冷态时的 $1/2$ ^[18]。热态试验时, 当流化风速超过 $0.7\ \text{m}/\text{s}$ 时炉膛上部压降明显增加, 此时炉内处于快速床状态。

2.2 试验点火

在点火前, 先通过电加热系统将炉膛密相区加热到 $600\ ^\circ\text{C}$, 然后少量投煤点火。图 4 为点火时氧

气体积分数及密相区温度随着火时间(以氧量发生变化的时刻作为煤着火的起始时间点)的变化。随着煤燃烧的进行,密相区温度逐渐升高,当温度达到 850 °C 且升温缓慢时,可以正常给煤,并逐步降低电加热功率,最终切除炉膛电加热并将流化风温维持在 300 °C 左右,同时通过调整风量使得床温维持在 850 °C ~ 950 °C 之间。当燃烧稳定时加入煤与木屑的混合燃料,并通过 MCGS 系统和烟气分析仪监测温度、压力及烟气成份。

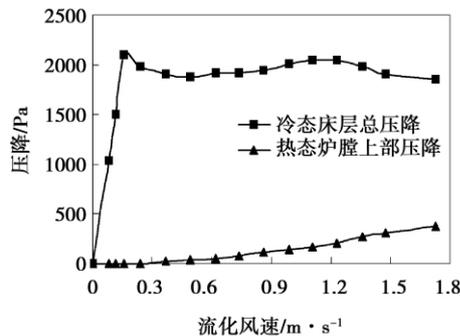


图3 压降与流化风速的关系

Fig. 3 Relationship between the pressure drop and the fluidized air speed

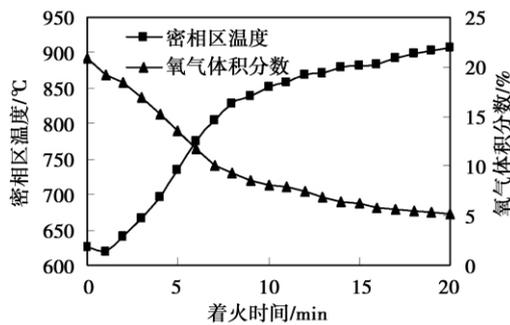


图4 点火启动阶段氧气体积分数及密相区温度随时间的变化

Fig. 4 O₂ volumetric fraction during the ignition and startup period and change of the temperature in the dense phase zoen with time

2.3 木屑与煤在流化床中的燃烧特性

试验通过测定燃烧温度沿炉膛高度方向的变化,研究煤与木屑混烧的燃烧特性。图5为煤与木屑混烧(5:1)瞬时温度分布,图6为煤与木屑质量比5:1混合燃烧时,炉膛不同位置温度随时间的变化(图中r为炉膛相对高度,即测点位置与炉膛高度之比),可见煤与木屑混烧时,燃烧温度稳定,波动幅度不大,没有出现结焦现象。图5中分离器出口

温度和回料阀温度明显偏低,主要原因是分离器和回料阀采用 2 mm 厚不锈钢薄板制作,且钢板内外两侧都没有保温。

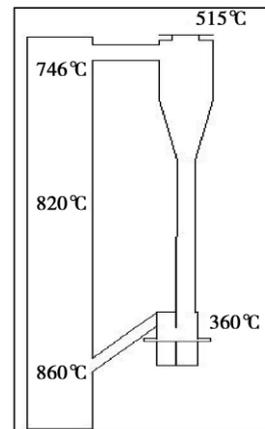


图5 煤与木屑混烧(5:1)瞬时温度分布

Fig. 5 Distribution of the transient temperature during the combustion of coal mixed with sawdust(5:1)

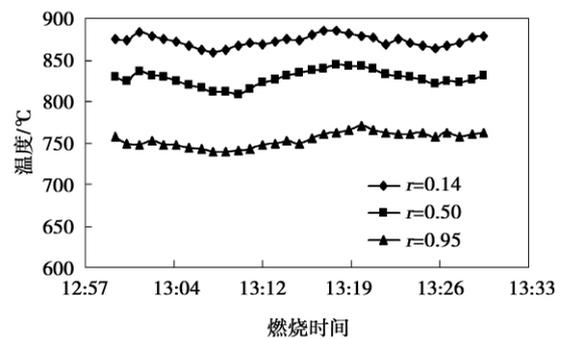


图6 燃烧温度随时间的变化

Fig. 6 Change of the combustion temperature with time

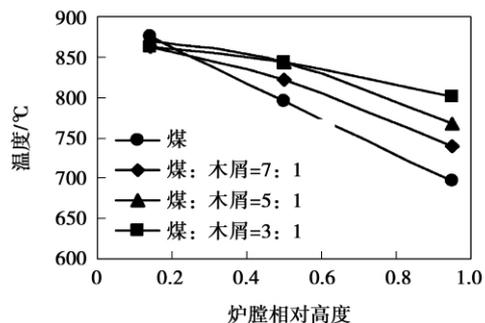


图7 不同燃料燃烧温度沿炉膛相对高度的变化
Fig. 7 Change of the combustion temperature with the relative height of the furnace when various fuels are burned

图 7 为不同煤木屑质量比在流化风速为 0.98 m/s 下,燃烧温度沿炉膛相对高度的变化。可以看出,单烧煤时,密相区温度较高,这是由于固定碳含量越高,大量的碳在密相区燃烧,所以密相区温度就越高。随着混入含碳量较低的木屑,密相区温度略有降低,温度沿炉膛高度变化曲线呈较明显的“抛物线”型。这是由于木屑挥发份含量高,而对于高挥发份的燃料,挥发份首先在密相区释放,然后进入稀相区燃烧,此外,木屑比重较小,很容易被吹到炉膛上部燃烧,使得稀相区温度比单烧煤时要高。

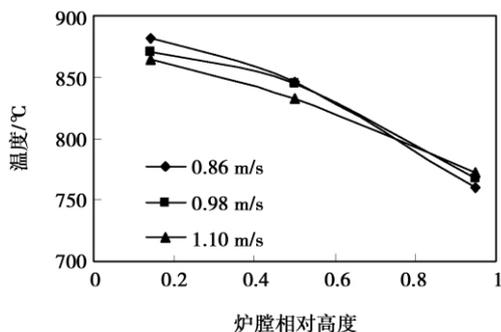


图 8 燃烧温度沿炉膛相对高度的变化
Fig. 8 Change of the combustion temperature with the relative height of the furnace

图 8 为煤、木屑质量比(5:1)不变的情况下,不同流化风速下燃烧温度沿炉膛相对高度的变化,从图中可以看出,随着风量的加大,燃烧中心上移,密相区温度也随着降低,炉膛温度分布曲线变得更为平缓,炉内热量分布也变得较为均匀。

2.4 污染物排放特性

燃烧过程中,产生大量烟气,应用烟气分析仪测定不同运行工况下 CO、SO₂、NO_x 及 O₂ 的含量。(注:本文气体排放浓度按 O₂ = 6% 基准折算)

一般认为,CO 来源于燃烧的热化学过程,在低于 1000℃ 的环境下,CO 主要来源于 C 与 CO₂ 和 H₂O 的多相反应^[7]。在充分的氧化氛围下,绝大多数 CO 被氧化生成 CO₂,因此烟气中 CO 含量很少。如图 9 所示,随着流化风速的提高,燃烧中心上移,燃烧产生的 CO 未能充分燃烧即被烟气带出炉膛,使炉膛出口烟气中 CO 的含量增加,蒙爱红等人的研究也证实了这一点^[14]。在同一流化风速下,当木屑的含量增加时,燃料中挥发份所占的比例也随着增加,加之燃烧中心上移,导致 CO 的产生量有所增加。因此,在掺烧木屑时,应通过增加二次风等措施,加强炉膛上部空间的扰动,强化烟气混合。

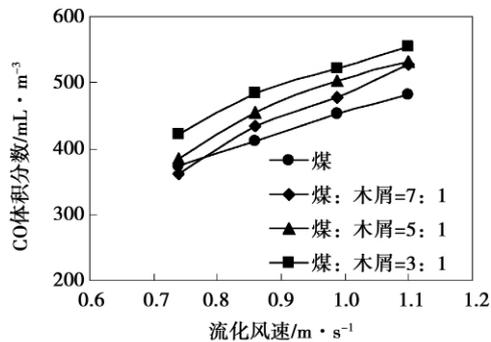


图 9 CO 体积分数随流化风速的变化
Fig. 9 Change of the CO volumetric fraction with the fluidized air speed

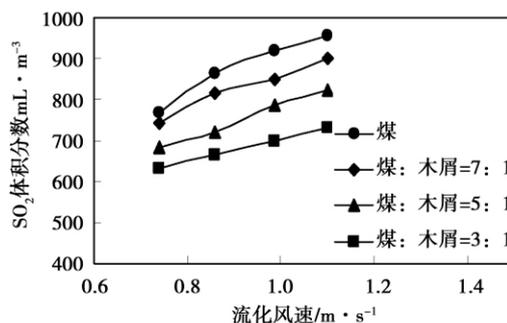


图 10 SO₂ 体积分数随流化风速的变化
Fig. 10 Change of the SO₂ volumetric fraction with the fluidized air speed

煤中 SO₂ 形成途径有两种,一种为: S → H₂S → HS → SO → SO₂, 另一种以 COS 为中间途径:



然后 COS 经氧化生成 SO₂^[19]。图 10 为给料量一定时,不同燃料配比条件下,烟气中 SO₂ 体积分数随流化风速的变化。Mahmoud A Youssef 等人研究表明在流化床中单烧木屑^[6],SO₂ 排放浓度很低,从图中可以看出,单烧煤 SO₂ 体积分数很高,在同一流化风速下,当木屑的混合比例增加时,由于木屑含硫量很低(仅为 0.03%),SO₂ 体积分数明显降低。此外,氧化气氛有助于 SO₂ 的生成,因此,随流化风速的增加,SO₂ 体积分数也随着增加,Grovest 等人也发现同一趋势^[20]。

NO_x 的产生量与氧量、温度和燃料等有关,随流化风速的增加,燃烧区还原气氛减弱,NO_x 产生量增加,但流化风速的增加也带来燃烧区温度的降低,导致 NO_x 转化率降低^[19]。试验发现 NO_x 体积分数随

流化风速的变化并不明显,如图 11 所示,这与 Mahmoud A Youssef、V I Kouprianova 等人的研究结果一致^[6-7]。图 12 为不同燃料,NO_x体积分数随密相区温度的变化,从图中可以看出,随着密相区温度的升高,NO_x体积分数也随着增加,这是因为挥发份中的氮随温度的增加,析出的百分比也增大。同一密相区温度下,木屑所占的比例越大,燃烧释放的还原性气体如 CO、H₂ 等越多,析出的还原性气体与 O₂ 反应,消耗大部分的 O₂,使 NO_x 生成区域还原性气氛迅速增强,因而 NO_x 产生量减少。

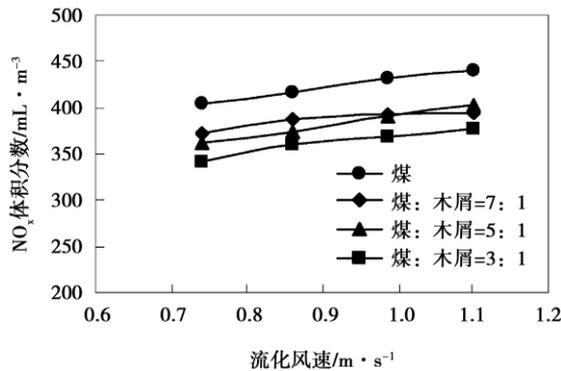


图 11 NO_x 体积分数随流化风速的变化

Fig. 11 Change of the NO_x volumetric fraction with the fluidized air speed

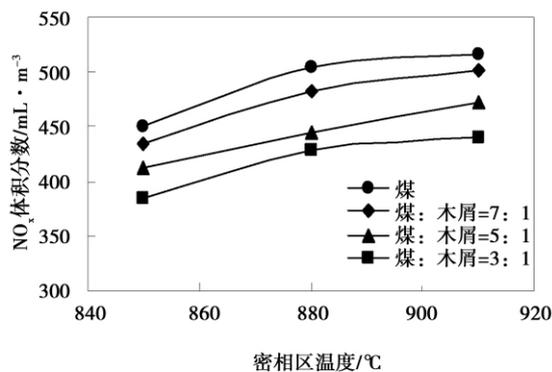


图 12 NO_x 体积分数随密相区温度的变化

Fig. 12 Change of the NO_x volumetric fraction with the temperature in the dense phase zone

3 结 论

(1) 试验表明,木屑与煤质量比在 1:3、1:5 和 1:7 的范围内,能在循环流化床中 850 ~ 950 °C 的温

度下稳定燃烧;

(2) 随着木屑混合比例的增加,燃烧中心往上移动,炉膛温度分布曲线呈“抛物线”型;

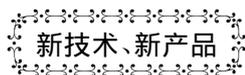
(3) 其它运行参数不变时,由于受炉膛高度限制以及缺少二次风,CO 体积分数随流化风速增加而增加;SO₂ 体积分数也随流化风速增加而增加;NO_x 体积分数受流化风速的影响并不明显;当密相区温度升高时,NO_x 体积分数增加;同样的流化风速下,当木屑混合比例增加时,CO 体积分数增大,SO₂、NO_x 体积分数则降低。

参考文献:

- [1] Preto F. Combustion of wood processing residues in a circulating fluidized bed [C] // Sama V pispapat ed proceeding of 17th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Florida ASME, May 2003: 607 - 612.
- [2] Conneu M G R. Carbon sequestration and biomass energy offset: theoretical potential and achievable capacities globally, in Europe and the UK [J]. Biomass and Bio - energy, 2003, 24 (2): 97 - 116.
- [3] Sami M ,Annamalai K ,Wooldridge M. Co-firing of coal and biomass fuel blends[J]. Progress in Energy and Combustion Science , 2001 27: 171 - 214.
- [4] HAN J ,KIM H ,CHO S ,et al. Fluidized bed combustion of some woody biomass fuels[J]. Energy Sources Part A-recovery Utilization And Environmental Effect 2008 ,19: 1820 - 1829.
- [5] 卢啸风,大型循环流化床锅炉设备与运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [6] LU Xiao-feng. Equipment and operation of a large-sized circulating fluidized bed boiler [M]. Beijing: China Electric Power Press 2006.
- [7] Mahmoud A Youssef ,Sedik S Wahid ,Maher A Mohamed ,et al. Experimental study on Egyptian biomass combustion in circulating fluidized bed[J]. Applied Energy 2009 86: 2644 - 2650.
- [8] Kouprianova V I ,Permchart W. Emissions from a conical FBC fired with a biomass fuel[J] ,Applied Energy 2003 74: 383 - 392.
- [9] Permchart W ,Kouprianov V I. Emission performance and combustion efficiency of a conical fluidized-bed combustor firing various biomass fuels[J] ,Bio-resource Technology 2004 2: 83 - 91.
- [10] Laursen K ,Grace J R. Some implications of co-combustion of biomass and coal in a fluidized bed boiler[J]. Fuel Processing Technology 2002 76: 77 - 89.
- [11] Vamvuka D ,Pitharoulis M ,Alevizos G ,et al. Ash effects during combustion of lignite/biomass blends in fluidized bed[J]. Renewable Energy 2009 34 : 2662 - 2671.
- [12] Lia X T ,Grace J R ,Lim C J ,et al. Biomass gasification in a circulating fluidized bed [J]. Biomass and Bioenergy ,2004 ,26: 171 - 193.
- [13] Sylvie Valin ,Serge Ravel ,Jacques Guillaudeau ,et al. Comprehensive study of the influence of total pressure on products yields in

- fluidized bed gasification of wood sawdust [J]. Fuel Processing Technology 2010 91: 1222 - 1228.
- [13] 蒋旭光,李香排,池涌,等.木屑焚烧过程中氯化氢排放特性研究[J].燃料化学学报 2004 32(3): 307 - 310.
JIANG Xu-guang, LI Xiang-pai, CHI Yong, et al. Study of the HCl emission characteristics during the incineration of sawdust [J]. Journal of Fuel Chemistry 2004 32(3): 307 - 310.
- [14] 蒙爱红,李清海,张衍国,等.塑料和生物质在循环流化床内燃烧特性的实验研究[J].清华大学学报 2008 48(5): 828 - 831.
MENG Ai-hong, LI Qing-hai, ZHANG Yan-guo, et al. Experimental study of the combustion characteristics of plastics and bio-mass in a circulating fluidized bed [J]. Journal of Tsinghua University, 2008 48(5): 828 - 831.
- [15] 董信光,李荣玉,刘志超,等.生物质与煤混燃的灰分特性分析[J].中国电机工程学报 2009 29(26): 118 - 124.
DONG Xin-guang, LI Rong-yu, LIU Zhi-chao, et al. Analysis of the ash content characteristics during combustion of coal mixed with biomass [J]. Journal of China Electric Machinery Engineering 2009 29(26): 118 - 124.
- [16] 董长青,杨勇平,倪景峰,等.木屑和聚乙烯流化床共气化实验研究[J].中国电机工程学报 2007 27(5): 55 - 60.
DONG Chang-qing, YANG Yong-ping, NI Jing-feng, et al. Experimental study of the cogasification of sawdust and polyethylene in a fluidized bed [J]. Journal of China Electric Machinery Engineering 2007 27(5): 55 - 60.
- [17] 刘荣厚,栾敬德.榆木木屑快速热裂解主要工艺参数优化及生物油成分的研究[J].农业工程学报 2008 24(5): 187 - 190.
LIU Rong-hou, LUAN Jing-de. Study on the optimization of the main process parameters of the quick thermal cracking of elm sawdust and its bio-mass oil composition [J]. Journal of Agricultural Engineering 2008 24(5): 187 - 190.
- [18] 蒋敏华,肖平.大型循环流化床锅炉技术[M].北京:中国电力出版社 2009.
JIANG Min-hua, XIAO Ping. Large-sized circulating fluidized bed boiler technology [M]. Beijing: China Electric Power Press 2009.
- [19] 岑可法,倪明江,骆仲泱.循环流化床锅炉理论设计与运行[M].北京:中国电力出版社 1998.
CEN Ke-fa, NI Ming-jiang, LUO Zhong-yang. Theoretical design and operation of circulating fluidized bed boilers [M]. Beijing: China Electric Power Press 1998.
- [20] Grovest S J, Williamson T, Sanyal A. Decomposition of pyrite during combustion of coal [J]. Fuel. 1987 66: 478 - 486.

(辉 编辑)



燃气轮机的升级和改进

据《Gas Turbine World》2012 年年度手册报道,燃气轮机制造商利用改进的设计技术定期升级和改进燃气轮机,以便提高其输出功率和效率。

从 2008 到 2012 年,升级和改进了 27 型燃气轮机。列出了原设备制造商和燃气轮机型号、改进和推出年份、额定输出功率、热耗率、输出功率/热耗率的变化、纯收益等。

例如,Solar 公司于 1994 年推出的 Taurus 70 燃气轮机的额定输出功率为 6 300 kW,热耗率为 11 500 kJ/(kW·h)。经过 2011 年的改进,其输出功率增加到 8 000 kW,增幅为 27.0%,热耗率降低到 10 503 kJ/(kW·h),减幅达 8.7%。

1992 年 Mitsubishi 公司推出 M701F4 燃气轮机,其额定输出功率为 2 357 kW,热耗率为 9 790 kJ/(kW·h)。2010 年改进后,其输出功率增加到 324 300 kW,增幅 37.6%,热耗率降低到 9 026 kJ/(kW·h),减幅 7.8%。

(吉桂明 摘译)

sity ,Nan-ning ,China ,Post Code: 530004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27(4) .
-498 ~ 503

A contrast test was performed on a S195 direct spraying diesel engine. The test results show that to burn bio-diesel and ethanol-diesel will deteriorate the power performance of the diesel engine ,however ,the power performance of the diesel engine burning rapeseed oil-based bio-diesel is close to that of the diesel burning pure diesel and that of the diesel engine burning ethanol-diesel is relatively poor. Both oil consumption rates of the diesel engine burning bio-diesel and ethanol-diesel are higher than that burning pure diesel. The oil consumption rate of the bio-diesel is higher than that of ethanol-diesel. However ,with an increase of the load ,this difference will assume a descending tendency. Both bio-diesel and ethanol-diesel can maintain a relatively low amount of CO emissions in a comparatively large range when compared with pure diesel. However ,at a low load ,such an improvement is not evident and even gets worsened. At a high load ,the CO emissions of the blended fuels will decrease much more than those of pure diesel. Under the majority of the operating conditions ,the HC emissions of both bio-diesel and ethanol-diesel are higher than that of pure diesel and the NO_x and carbon-contained flue gas emissions of the bio-diesel and ethanol-diesel are lower than that of pure diesel ,among them ,the bio-diesel behaves better than the ethanol-diesel. **Key words:** rapeseed oil ,bio-diesel ,engine performance ,engine emissions ,ethanol-diesel

循环流化床中木屑与煤混烧特性的试验研究 = **Experimental Study of the Blended-combustion Characteristics of Sawdust and Coal in a Circulating Fluidized Bed** [刊 汉] TANG Xiu-neng ,LU Xiao-feng ,LU Jia-yi (Education Ministry Key Laboratory on Low Quality Energy Source Utilization Technologies and Systems ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2012 27 (4) . - 504 ~ 509

In a self-developed small-sized circulating fluidized bed with the furnace dimensions of 150 mm × 150 mm × 2500 mm ,a blended combustion test of sawdust and coal was performed to study the combustion characteristics and pollutant emissions characteristics. It has been found that mixtures of sawdust and coal in mass proportions of 1:3 ,1:5 and 1:7 can maintain a stable combustion in the circulating fluidized bed. With an increase of the proportion of sawdust ,the high temperature combustion zone will shift upwards and the curves showing the temperature distribution in the furnace will assume a "parabola" shape. With a rise of the temperature in the dense-phase zone ,the NO_x volumetric fraction will increase. At a same fluidized air speed ,with an increase of the proportion of sawdust ,the CO volumetric fraction will increase and the SO_2 and NO_x volumetric fractions ,however ,will decrease. **Key words:** circulating fluidized bed ,sawdust and coal ,blended combustion