

循环流化床中糠醛渣与煤混燃特性的试验研究

潘智, 卢啸风, 梅琳, 王泉海

(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: 在炉膛尺寸为 150 mm × 150 mm × 2 500 mm 的循环流化床燃烧试验台上进行糠醛渣与煤的混燃试验, 研究其燃烧特性、尾部飞灰及烟气排放特性。研究表明: 糠醛渣掺混质量比例为 10% - 50% 的混合燃料在循环流化床中均可稳定燃烧; 随着糠醛渣的掺混比例增加, 炉膛上部温度升高, 尾部飞灰含碳量下降, 而颗粒排放浓度升高; 随着流化风速增加, 炉膛上部温度升高。密相区的温度升高, CO 排放浓度下降, SO₂、NO_x 排放浓度上升; 糠醛渣的掺混比例增加, CO 排放浓度上升, SO₂、NO_x 排放浓度下降。

关键词: 循环流化床; 糠醛渣; 煤; 混燃

中图分类号: TK62; TK223.7 **文献标识码:** A

引言

糠醛渣是玉米芯、油茶壳、稻壳、甘蔗渣等富含多聚戊糖的农林作物经水解生产糠醛(呋喃甲醛)的副产品^[1]。我国是糠醛生产大国, 根据相关资料显示每生产 1 t 糠醛约附带产生糠醛渣 10 t, 若将糠醛渣直接排放, 必然会使水体受到污染^[2]。将糠醛渣作为生物质燃料加以利用, 一方面使废弃资源得到充分的利用; 另一方面也能够减少废弃糠醛渣对环境的危害。目前, 采用层燃方式的燃糠醛渣锅炉均不同程度存在着运行不稳定、燃烧效率低等问题^[3-4]。循环流化床燃烧技术具有燃烧效率高、污染物排放少、燃料适应性广和负荷调节范围大等优点, 可成为糠醛渣等生物质燃料利用的有效技术手段^[5]。

对糠醛渣燃烧特性的研究, 周彩荣、衣晓青、王宪红等通过热天平分析研究了糠醛渣与煤在不同升温速率下^[6-9], 不同混合比例下的着火、燃尽等特性。别如山等研究了糠醛渣在流化床内的烧结特性以及热天平分析^[10]。糠醛渣与煤掺烧时产生烧结的可能性很小, 湿物料的着火温度随所含水分的提高而增加。杨志荣等在流化床实验台上对糠醛渣的燃烧特性进行研究^[11-12], 重点研究了糠醛渣燃尽时间

的影响因素, 得出随床温、流化速度的增加, 燃尽时间缩短。吴东火等提出一种燃烧糠醛渣的差速流化床锅炉的设计方法^[13], 通过双级燃烧方式保证锅炉的正常运行。糠醛渣与煤在循环流化床中混燃的研究较少, 具体掺混比例对炉内燃烧情况的影响仍缺少研究。此外, 污染控制是锅炉运行需要考虑的重要环节, 而对糠醛渣燃烧时尾部烟气排放特性的研究却鲜有报道。

基于此, 在小型循环流化床热态试验台上进行糠醛渣与煤掺混燃烧, 研究其燃烧特性、尾部飞灰及烟气排放特性, 为糠醛渣作为燃料利用提供参考依据。

1 试验概况

1.1 试验物料的性质

试验用煤为重庆中梁山烟煤, 经过筛分粒径小于 2 mm; 糠醛渣来自某糠醛厂, 粒径小于 2 mm; 试验用床料选用经筛分的返料换热型循环流化床锅炉循环灰颗粒, 颗粒粒径上限为 1 mm。经测量, 糠醛渣、煤与床料的颗粒(真实)密度分别为 870、1 322 和 2 182 kg/m³, 堆积密度分别为 319、920 和 1 156 kg/m³。糠醛渣、煤与床料的粒径分布如图 1 所示, 糠醛渣与煤的工业分析及元素分析如表 1 所示。

1.2 试验台系统

试验在自行研制的小型多功能循环流化床试验台上进行, 试验系统如图 2 所示, 主要由炉膛本体、给料系统、送风系统、电加热点火系统、水冷系统、测量系统等组成。

炉膛截面尺寸为 150 mm × 150 mm, 高度为 2 500 mm。旋风分离器采用不锈钢制作, 在立管中部安装耐高温的石英玻璃管, 以便观察回料及流化情

收稿日期: 2013-09-22; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 江西省科技计划项目(20122BBG70087)

作者简介: 潘智(1987-), 男, 广西桂林人, 重庆大学硕士研究生。

况 采用 U 型回料阀 ,尾部烟道安装蛇形管以降低 排烟温度 布置旋风除尘器以减少飞灰排放。

表 1 糠醛渣与煤的工业分析与元素分析

Tab. 1 Industrial and elemental analysis of furfural residue and coal

样品名称	工业分析 /%				$Q_{net,y,d}$ /kJ · kg ⁻¹	元素分析 /%				
	M _{ad}	V _{ad}	A _{ad}	FC _{ad}		C _{ad}	H _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	O _{ad}
糠醛渣	9.44	55.78	14.69	20.09	10 937	43.65	6.76	0.68	0.79	23.99
煤	1.56	19.08	30.70	48.32	22 610	58.63	3.27	0.95	2.89	3.56

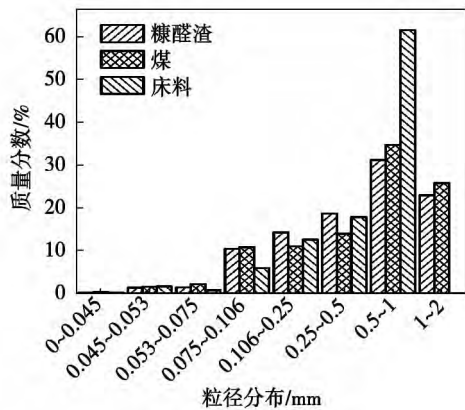


图 1 糠醛渣、煤以及床料的粒径分布

Fig. 1 Distribution of particle diameters of furfural residue, coal and bed material

试验前 先启动电加热系统将炉膛底部温度加热到 550 °C 然后由给料系统投煤点火。随着燃料着火燃烧 炉膛下部温度逐渐升高 当温度达到 850 °C 并且保持缓慢升温时 关闭电加热系统 通过调整风量和给料量将床温维持在 850 - 950 °C 之间。

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 2 所示。通过 MCGS 系统采集记录温度及压力数据 通过烟气分析仪记录烟气成分。糠醛渣所占比例分别为 0%、10%、20%、30% 和 50% ,流化风速分别为 0.69、0.79 和 0.89 m/s。

2 试验结果与分析

2.1 炉膛温度分布

试验过程中 温度由 MCGS(监视与控制通用) 系统自动采集记录。选取炉膛底部温度稳定在 890 °C 时各工况的炉膛温度分布情况 通过对比得出掺混比例和流化风速对炉内温度分布的影响。

图 3 是当流化风速为 0.79 m/s 时不同掺混比例的混合燃料燃烧时炉膛内温度沿高度方向的分布

情况。由图 3 可见 糠醛渣的掺混比例越高 炉膛上部温度越高 炉内温度分布越均匀。这是由于糠醛渣的堆积密度较小 挥发分含量高 着火温度低。随着糠醛渣所占比例增加 更多糠醛渣被流化风带到炉膛中、上部燃烧 从而致使炉膛中、上部温度升高 炉膛上下温度更趋于均匀。随着糠醛渣比例进一步增加 煤的比例减少 密相区高温燃烧区域向上移动 温度开始呈现出“抛物型”分布。

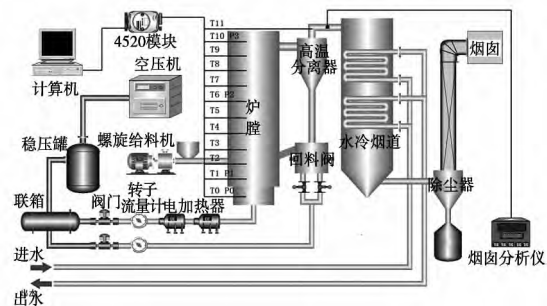


图 2 循环流化床试验系统

Fig. 2 Circulating fluidized bed test system

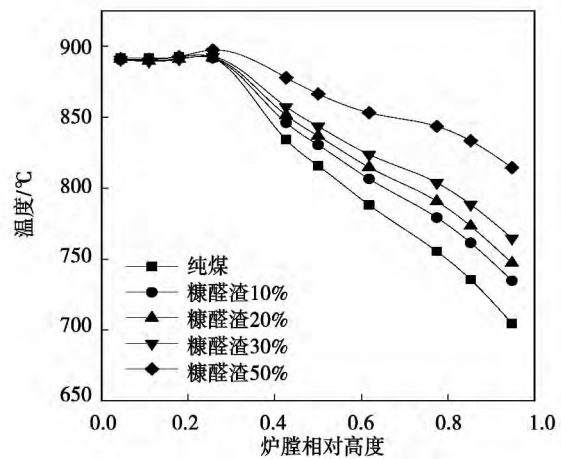


图 3 不同掺混比例下的炉膛温度分布

Fig. 3 Distribution of the temperature in the furnace at various mixing-dilution proportions

糠醛渣比例为 20% 时,不同流化风速下,炉膛内温度沿高度方向的分布情况如图 4 所示。同样,流化风速越高,炉膛上、下部温度越接近。随着流化风速的增加,更多燃料被带到炉膛上部燃烧,使上部温度升高。并且由于流化风速增加,氧量更充足,炉膛上部燃料以及糠醛渣析出的还原性气体能更充分燃烧。

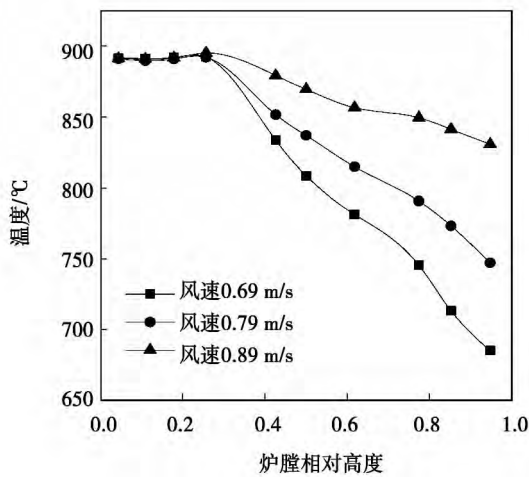


图 4 不同流化风速下的炉膛温度分布
Fig. 4 Distribution of the temperature in the furnace at various fluidized air speeds

2.2 飞灰含碳量与颗粒排放浓度测定

飞灰从尾部的旋风除尘器取样,通过烧失法测定其含碳量。燃料在不同掺混比例下的飞灰含碳量如图 5 所示。由图可知,随着糠醛渣所占比重的增加,飞灰含碳量呈下降趋势。由于糠醛渣挥发分高,固定碳含量相对较低,产生的飞灰残碳也相对较少。并且随着糠醛渣所占比重增加,炉膛上部颗粒浓度增加,成团返混现象加强,燃料在炉内的停留时间更长,且炉膛上部温度升高,燃烧相对充分,飞灰含碳量下降。

根据灰平衡的计算方法^[14],由入炉灰量、底渣增重量、尾部除尘器飞灰量及含碳量计算出烟囱实际排灰量,再由烟囱实际排灰量与总烟气量估算出颗粒排放浓度。不同掺混比例下的颗粒排放浓度如图 5 所示。由图可见,颗粒排放浓度随着糠醛渣掺混比例的增加而增加。由于糠醛渣比重较小,挥发分较高,燃烧形成的灰颗粒相对更细,更难被分离器分离下来。随着糠醛渣比例增加,燃烧产生更多细颗粒被烟气带出尾部烟道而使颗粒排放浓度上升。

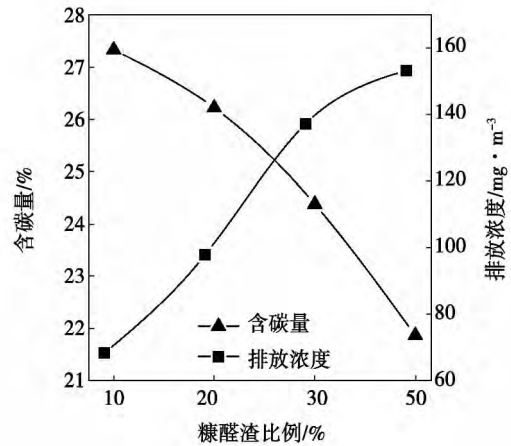


图 5 不同掺混比例的飞灰含碳量及颗粒排放浓度

Fig. 5 Carbon content of the flying ash and particle emissions concentration at various mixing-dilution proportions

2.3 烟气成分测定与分析

试验过程中,将密相区温度依次控制在 820、850、880、920 和 950 ℃5 个温度点附近,用烟气分析仪测定燃烧产生的烟气中 CO、SO₂ 和 NO_x 的排放浓度,其中气体排放浓度按 O₂ = 6% 基准折算。

图 6 为 CO 排放浓度随密相区温度的变化情况。由图可见,CO 排放浓度随着密相区的温度升高而下降。密相区温度通过调节给料量和流化风速来控制,密相区温度升高时氧量更充足,更多 CO 被氧化生成 CO₂,因而 CO 排放浓度大幅下降。而在同一密相区温度下,CO 排放浓度随着糠醛渣掺混比例的增加而增加。由于糠醛渣所占比例增加,挥发分所占的比例增加,由于炉膛高度的限制和缺少二次风,使更多的 CO 未能燃烧生成 CO₂,于是烟气中 CO 的含量增加。

图 7 为 SO₂ 排放浓度随密相区温度的变化情况。由图可见,SO₂ 排放浓度总体上随着密相区温度升高而增大。由于密相区温度升高时,风量相对较大,炉膛下部氧浓度更高,而含硫较多的煤集中在这一区域,从而使 SO₂ 的生成量增加。而在同一密相区温度下,糠醛渣所占比例增大,SO₂ 的排放浓度减小。这是由于糠醛渣的含硫量更小,随着糠醛渣掺混比例增加,生成的 SO₂ 相应的减少。另外,由于糠醛渣灰分中含有碱金属或碱金属的氧化物,能够与 SO₂ 反应生成硫酸盐,从而起到降低 SO₂ 排放

的作用。

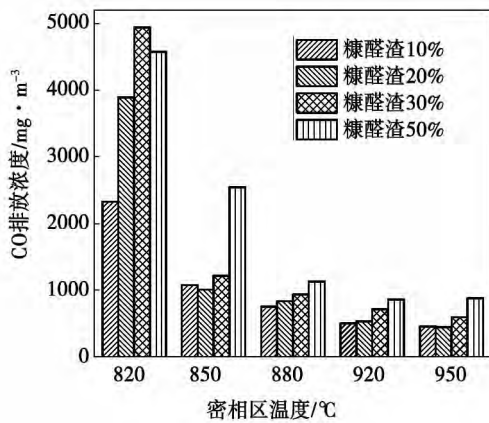


图 6 CO 排放浓度随密相区温度的变化

Fig. 6 Changes of the CO emissions concentration with the temperature in the dense-phase zone

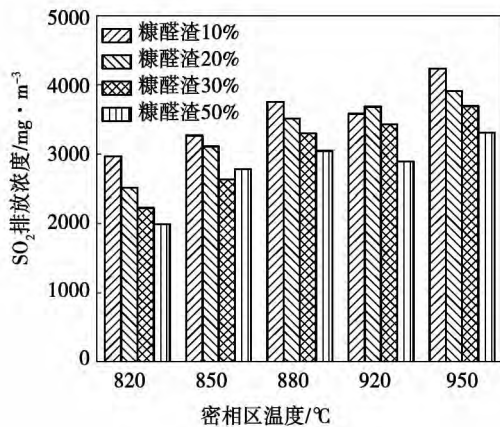


图 7 SO₂ 排放浓度随密相区温度的变化

Fig. 7 Changes of the SO₂ emissions concentration with the temperature in the dense-phase zone

图 8 为 NO_x 排放浓度随密相区温度的变化情况。由图可见, NO_x 排放浓度随着密相区的温度升高而增大。NO_x 的产生量与氧量、温度等因素有关, 密相区温度升高时, 燃烧更充分, 还原性气氛减弱, NO_x 转化率升高。而在相同的密相区温度下, 糠醛渣所占比例越大, NO_x 的排放浓度越小。这是由于糠醛渣所占比例增加时, 燃烧时产生的还原性气体增加, 消耗更多的 O₂ 与其反应, 使 NO_x 生成区域还原性气氛增强, 因而抑制了 NO_x 的生成。

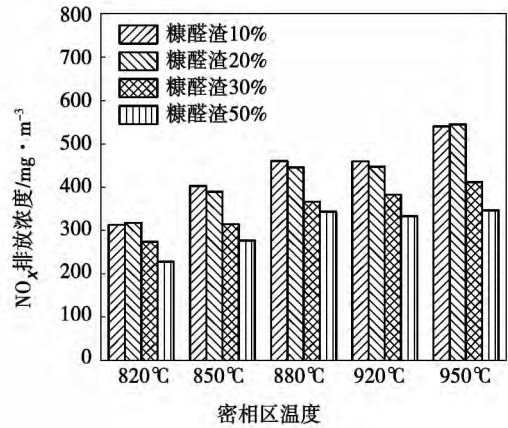


图 8 NO_x 排放浓度随密相区温度的变化

Fig. 8 Changes of the NO_x emissions concentration with the temperature in the dense-phase zone

3 结 论

(1) 在糠醛渣掺混比例为 10% - 50% 流化风速分别为 0.69、0.79 和 0.89 m/s 时, 糠醛渣与煤的混合燃料在循环流化床中均可稳定燃烧。随着糠醛渣的掺混比例增加, 炉膛中、上部温度升高, 炉内温度呈现“抛物型”分布。随着流化风速增加, 炉膛中上部温度升高。

(2) 由于糠醛渣比重较小, 挥发分含量较高, 糠醛渣掺混比例增加时, 飞灰含碳量下降, 而颗粒排放浓度升高。

(3) 随着炉膛密相区温度的升高, 尾部烟气中 CO 的排放浓度总体呈下降趋势, 而 SO₂、NO_x 的排放浓度呈上升趋势。随着糠醛渣掺混比例的增加, CO 排放浓度呈上升趋势, 而 SO₂、NO_x 排放浓度呈下降趋势。

参考文献:

[1] 尹玉磊, 李爱民, 毛燎原等. 糠醛渣综合利用技术研究进展 [J]. 现代化工. 2011, 11(31): 22-24.
YIN Yu-lei, LI Ai-min, MAO Liao-yuan, et al. Advances in the study of the comprehensive technologies for utilizing furfural residue [J]. Modern Chemical Industry. 2011, 11(31): 22-24.

[2] ZHANG Shi. Study on Components of Furfural Residue from Corn-cob [J]. Journal of Northeast Forestry University. 1991, 2(1): 98-107.

[3] 边 际. 75 t/h 全燃糠醛渣差速流化床锅炉的设计[J]. 工业锅炉 2009(4): 11 - 13.
BIAN Ji. Design of a 75 t/h furfural-residue-fired differential speed circulating fluidized bed boiler [J]. Industrial Boiler 2009(4): 11 - 13.

[4] 金 旭. 浅谈利用高低循环流化床技术改造燃用糠醛渣锅炉[J]. 江西能源 2008(4): 74 - 77.
JIN Xuan. Exploratory analysis of a furfural-residue-fired boiler reconstructed by using the high-low circulating fluidized bed technology [J]. Jiangxi Energy 2008(4): 74 - 77.

[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.
LU Xiao-feng. Equipment and operation of a large-sized circulating fluidized bed boiler [M]. Beijing: China Electric Power Press 2006.

[6] 周彩荣, 任军亮, 徐敏强. 废弃糠醛渣的热分析研究[J]. 郑州大学学报 2011 32(4): 81 - 85.
ZHOU Cai-rong, REN Jun-liang, XU Ming-qiang. Study of the thermal analysis of furfural residue discarded [J]. Journal of Zhengzhou University 2011 32(4): 81 - 85.

[7] 衣晓青, 张翠珍. 糠醛渣与煤混烧特性的实验研究[J]. 煤炭转化 2006, 10(29): 55 - 59.
YI Xiao-qing, ZHANG Cui-zhen. Experimental study of the blended combustion characteristics of furfural residue and coal [J]. Coal Conversion 2006, 10(29): 55 - 59.

[8] 王宪红. 动力用煤混烧生物质燃烧特性及污染物排放特性研究[D]. 济南, 山东大学 2010.
WANG Xian-hong. Study of the combustion and pollutant emissions characteristics of coal mixed with biomass in a power plant [D]. Jinan: Shandong University 2010.

[9] ZHANG Cui-zhen, YAN Zhen-rong, YANG Mo, et al. Blended combustion characteristics of furfural residue and coal [C]. 3rd IASTED African Conference on Power and Energy Systems 2010.

[10] 别如山, 杨励丹, 陆慧林, 等. 糠醛渣在流化床中燃烧特性的试验研究[J]. 太阳能学报 2001 22(3): 287 - 291.
BIE Ru-shan, YANG Li-dan, LU Hui-lin, et al. Experimental study of the combustion characteristics of furfural residue in a fluidized bed [J]. Acta Energetica Solaris Sinica 2001 22(3): 287 - 291.

[11] 杨志荣. 糠醛渣在循环流化床中的燃烧特性试验研究[D]. 吉林: 东北电力大学 2012.
YANG Zhi-rong. Experimental study of the combustion characteristics of furfural residue in a fluidized bed [D]. Jilin: Northeast University of Electric Power 2012.

[12] QIN Hong, YANG Zhi-rong, WANG Qing, et al. Study of the furfural residue ignition in a fluidized bed [C]. International Conference on Transportation and Mechanical & Electrical Engineering, Changchun, China: 2012.

[13] 吴东火, 朱德辉, 张红霞. 浅谈一台 35 t/h 中温中压糠醛渣差速流化床锅炉的设计[J]. 工业锅炉 2003(2): 14 - 16.
WU Dong-huo, ZHU De-hui, ZHANG Hong-xia. Exploratory study of the design of a 35 t/h intermediate-temperature-and-pressure furfural-residue-fired differential speed circulating fluidized-bed boiler [J]. Industrial Boiler 2003(2): 14 - 16.

[14] 周一工. 循环流化床锅炉灰平衡和循环倍率计算方法探讨[J]. 锅炉技术. 1998 4: 9 - 11.
ZHOU Yi-gong. Exploratory study of the methods for calculating the ash balance and circulation rate of a circulating fluidized bed boiler [J]. Boiler Technology. 1998 4: 9 - 11.

(单丽华 编辑)

(上接第 207 页)

M701J 配备压比为 23:1 的 15 级轴流压气机。4 级轴流涡轮都采用空气冷却并且前 3 级应用了最新高温保护层。陶瓷热障涂层和高性能气膜冷却结合保证高温下部件的长寿命。

M701J 在燃烧火焰筒、过渡段和涡轮第 1 和第 2 级叶片上使采用了蒸汽冷却技术。

M701F/J 联合循环的额定性能:

单轴方案	1 × 1 M701F5	1 × 1 M701J
装置净输出功率/MW	525	680
净热耗率/kJ · kWh ⁻¹	5 902	5 835
净效率/%	61.0	61.7
燃气轮机输出功率/MW	354	463
汽轮机输出功率/MW	171	217

注: 额定值是发电机端子处的性能参数, 包括入口和出口损失以及 38.1 mm Hg 柱冷凝器压力下的参数值。

(吉桂明 摘译)

search Center for Fluid Machinery Engineering Technologies ,Zhenjiang ,China ,Post Code: 212013) ,ZHANG Jun-jie (Xinjie Pump Industry Group Co. Ltd. ,Taizhou ,China ,Post Code: 317525) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 ,29(2) . -202 -207

To study the influence of the solid particle content of the working medium conveyed by a centrifugal pump on its cavitation characteristics ,a method combining the numerical calculation and a comparison with the test results was used to perform a study in depth. It has been found that the solid particle content has a relatively big influence on the cavitation characteristics and the cavitation will be worsened with an increase of the solid particle content. Under the operating conditions having a constant pressure at the inlet ,the solid particle content has a relatively big influence on such factors as changes in the flow trajectory and speed of the vacuoles etc. inside the impeller. Under the operating conditions having a same degree of cavitation ,the solid volumetric fraction will increase with an increase of the solid particle content but will decrease in some areas affected by the cavitation. The solid volumetric fraction in the flow passages of the impeller will assume a nonlinear variation law as a result of the same variation law of the cavitation. **Key words:** centrifugal pump ,solid and liquid two-phase ,numerical simulation ,test

循环流化床中糠醛渣与煤混燃特性的试验研究 = **Experimental Study of the Blended Combustion Characteristics of Furfural Residue and Coal in a Circulating Fluidized Bed** [刊 ,汉] PAN Zhi ,LU Xiao-feng ,MEI Lin ,WANG Quan-hai(Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems ,Chongqing University ,Chongqing ,China ,Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 ,29(2) . -208 -212

On a circulating fluidized bed test stand with the dimensions of its furnace being 150 mm x 150 mm x 2 500 mm ,a blended combustion experiment was conducted of furfural residue and coal to study the combustion characteristics and flying ash and flue gas emissions characteristics in the tail portion. It has been found that all the coal fuels mixed and diluted with furfural residue in a mass proportion from 10% to 50% can produce stable combustion in the circulating fluidized bed. With an increase of the mixing-dilution proportion of furfural residue ,the temperature at the top of the furnace will increase and the carbon content of flying ash in the tail portion will decline while the particle emissions concentration will increase. With an increase of the fluidized air speed ,the temperature at the top of the furnace will increase. The temperature in the dense phase zone will increase ,the CO emissions concentration will decline and SO₂ and NO_x emissions concentration will increase. With an increase of the mixing-dilution proportion of furfural residue ,the CO emissions concentration will increase and SO₂ and NO_x emissions concentration will decrease. **Key words:** circulating fluidized bed ,furfural residue ,coal ,blended combustion