

对 CFB 燃烧 / 煤热解多联产工艺过程的开发

梁 鹏¹, 曲 旋², 王志峰³, 毕继诚²

(1 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266510)

2 中国科学院 山西煤炭化学研究所 煤转化国家重点实验室, 山西 太原 030004

3 中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103)

摘 要: 在处理量为 1 kg 煤的间歇式固体热载体热解装置上, 以高挥发份烟煤为原料, 石英砂作热载体, 进行热解特性评价实验。结果表明, 提高混合热解温度, 气体产率有所增加。温度高于 560 °C 时焦油产率可达 9% (wt) ~ 11% (wt)。通过模拟炉前低温干馏过程, 以高硫的坪石煤为原料, 发现循环灰具有明显的固硫作用, 热解产生的大部分气相硫被固定在灰中。同时, 结合实验室前期的研究结果以及正在进行的多联产中试试验, 对 CFB 燃烧 / 煤热解多联产工艺过程开发中的关键技术问题的解决方案, 如组合式 U 型返料器开发、反应器压力的控制方式、体系平衡关系的建立等进行了探讨。

关 键 词: 煤热解; 燃烧; 多联产; 热载体; 热解装置

中图分类号: TQ530.2 文献标识码: A

引 言

我国石油资源短缺, 煤的高效、综合利用在一定程度上可以减少对进口石油、天然气的依赖。在燃烧之前从高挥发份煤中提取部分液体燃料和精细化学品, 具有重要的意义^[1]。循环流化床 (CFB) 燃烧 / 煤热解多联产工艺即是以 CFB 锅炉的循环热灰为热载体, 原煤通过低温干馏释放出挥发份生产煤气和焦油, 干馏后的半焦物返送到 CFB 锅炉燃烧发电, 从而实现热、电、煤气、焦油的联合生产。该工艺将热解和燃烧过程耦合, 通过分级转化实现煤的资源化利用, 将丰富、廉价的煤高效地转化为洁净的二次能源。作为最有前途的煤炭多联产技术之一, CFB 燃烧 / 煤热解多联产工艺日益受到研究者的重视^[2-4]。迄今为止, 该工艺没有得到大规模的工业应用, 主要原因在于过程开发中普遍遇到了一些技术难题^[5], 如被热解气带出的粉尘细颗粒堵塞冷凝系统的管路, 部分重质焦油与粉尘粘附于旋风分离器内壁导致系统无法长时间稳定运行; 固体热载体与煤的混合技术有待于改进和完善, 机械搅拌虽然

能使煤和热载体得到良好的混合, 但其对动力的消耗增加了过程的成本^[6]。

本研究采用固体热载体煤混合热解工艺, 设计了一套煤处理量为 1 kg 的间歇式固体热载体实验装置, 以 3 种高挥发份烟煤为研究对象, 石英砂作为模拟热载体, 考察了反应条件对焦油、煤气收率及其特性的影响。通过模拟以高硫煤为原料的炉前低温干馏过程, 考察循环灰对硫在气、液、固产物中分布的影响, 以期多联产系统中硫的脱除和转化提供工业设计依据。同时, 结合实验室前期的研究结果以及正在陕西府谷进行的多联产中试试验, 对 CFB 燃烧 / 煤热解多联产工艺过程开发中的关键技术问题进行了探讨。

1 实验部分

1.1 实验物料

3 种高挥发份的烟煤分别取自安徽淮南、陕西神木和内蒙古准格尔旗, 粒度 < 3 mm。广东坪石高硫煤粒度为 0.125 ~ 0.224 mm。原料煤的工业分析和元素分析如表 1 所示。选用粒径 1 ~ 2 mm 的石英砂和取自太原近郊某电厂的 CFB 锅炉循环灰作为热载体。

表 1 煤样的元素分析和工业分析 (% (wt))

		淮南	神木	准格尔旗	坪石
工业分析	M_{ad}	1.16	8.28	6.36	0.88
	A_{ad}	23.10	2.99	11.76	22.69
	V_{ad}	27.03	34.19	30.03	26.71
元素分析	C_{daf}	83.85	81.39	80.51	81.91
	H_{daf}	5.53	4.96	4.59	5.81
	N_{daf}	1.35	1.06	1.45	1.29
	S_{daf}	0.83	0.20	0.81	9.56
	O_{daf}	8.44	12.39	12.64	1.43

收稿日期: 2009-02-06 修订日期: 2009-05-06

基金项目: 山东省中青年科学家奖励基金资助项目 (BS2009N1004); 煤转化国家重点实验室开放基金资助项目 (09-202)

作者简介: 梁 鹏 (1976-) 男, 山西长治人, 山东科技大学副教授, 博士研究生。

1.2 实验装置与流程

固体热载体煤热解实验装置及流程如图 1 所示。煤斗、灰斗采用外加电炉丝加热, 灰斗内同时设置石英加热棒以提高升温速率。热解反应器采用外加电炉丝加热以补偿散热损失。将预烘干的煤和石英砂加入煤斗和灰斗中, 并将系统用氮气置换。将煤预热到 100 °C; 根据热解反应温度的不同, 将石英砂预热到 700~900 °C。实验开始时, 启动 60 r/min 的螺旋搅拌器, 使得煤和热载体颗粒在下落和反应过程中能得到良好混合。开启连接于煤斗、灰斗与热解反应器间的电控阀, 将煤和热载体通过落料管同时投入热解反应器中, 煤粒被热砂快速加热, 挥发份通过反应器出口的粉尘净化装置进入冷凝系统。反应结束后, 开启反应器放料阀, 将反应后的半焦与热载体混合物快速落入熄焦槽内, 热半焦与空气的反应在最短时间内得到抑制。系统降温后用四氢呋喃清洗反应器出口、水冷器及气液分离器, 得到的液体经过滤后用旋转蒸发器蒸出溶剂和热解水, 四氢呋喃可溶物定义为油品, 并对该油品进行蒸馏处理; 气体产物通过湿式流量计计量, 从气体收集器中取样并进行气相色谱分析。

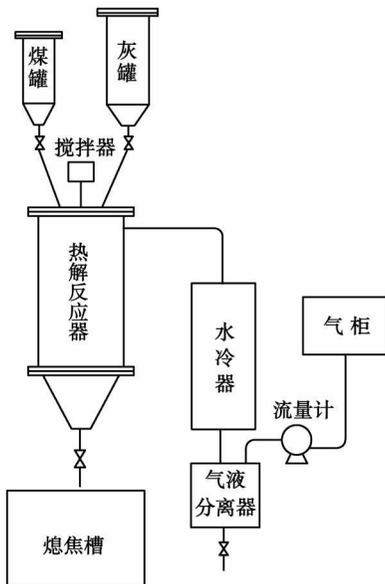


图 1 固定床固体热载体煤热解装置示意图

2 结果与讨论

2.1 产物分布及气体组成

图 2 和图 3 分别显示了煤粒径 < 3 mm 反应时间 4 min 时, 热解反应温度对 3 种高挥发份烟煤的

气、液产率的影响。可见, 提高热解温度可使气体产出率增加。相同温度下气体产出率由高到低的顺序为: 神木煤 > 准旗煤 > 淮南煤, 如图 1 所示, 从原煤工业分析的结果可以看出, 热解气体产出率与煤中挥发份的含量有关。液相产品产出率随热解温度升高略有增加, 但当热解温度高于 560 °C 时, 焦油产出率基本无变化。这说明对于实验所选择的 3 种烟煤, 热解反应温度为 560 °C 左右, 可得到最大焦油产出率, 所选 3 种烟煤焦油产出率可达 9%~11%。

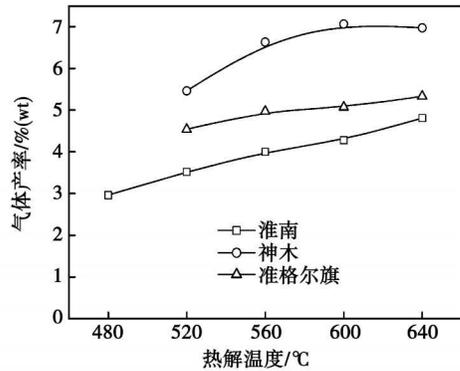


图 2 热解反应温度对气体产出率的影响

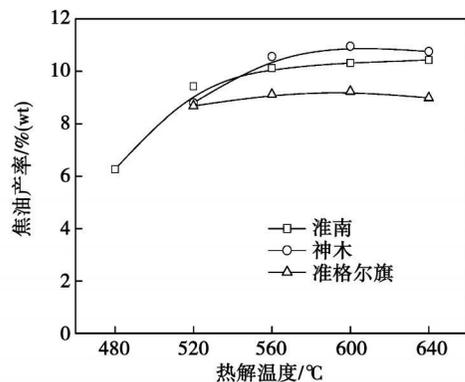


图 3 热解反应温度对焦油产出率的影响

热解反应温度对产出气组成的影响如图 4 所示。在实验所考察的热解温度范围内, 3 种烟煤的气体组成变化规律是一致的。随着热解反应温度的升高, 热解气中 H_2 的体积百分比增加, CO_2 的体积百分比降低, C_2^+ 烃类气体的体积百分比降低。淮南煤热解气中含氧气体 (CO 和 CO_2) 的体积百分比约为 20%, 而神木和准旗煤热解气中含氧气体的体积百分比达到 40%。主要原因在于, 热解气中含氧气体的体积分数与原煤中的含氧量有关, 研究表明, CO 主要由羰基和醚键的断裂分解生成, CO_2 主要来自煤中的羧基官能团^[7-8]。如图 4 所示, 高挥发份烟煤固体热载体热解获得的煤气富含氢气及烃类气

体,具有较高的热值,可作为民用燃气或在燃煤电厂燃烧发电。

芳香类硫,如噻吩等结构在所考察的温度范围内难以分解^[10]。

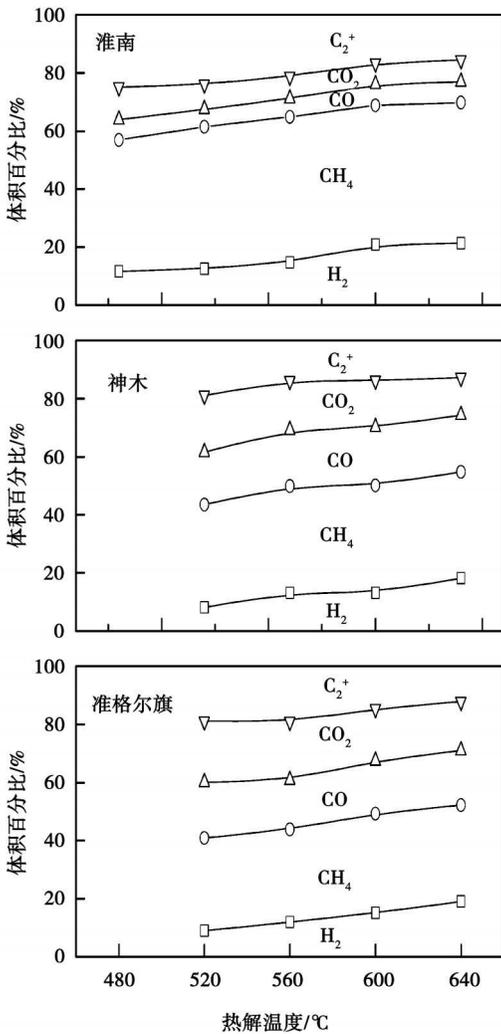


图 4 热解反应温度对气体组成的影响

2.2 循环灰对硫在热解产物中分布的影响

为了考察 CFB 燃烧煤热解多联产过程中含硫污染物的变迁规律,以高硫的坪石煤为研究对象,考察了热载体性质对煤中硫在气、液、固产物中的分布情况。图 5 显示了以惰性物料石英砂作为模拟热载体,不同温度下硫在气、液、固相产物中的分布状况。可见温度对坪石煤热解脱硫率(气相硫和液相硫占总硫的百分比)影响显著,热解温度由 480 °C 升高到 640 °C,脱硫率由 11.9% 升高到 30.2%。随着热解温度的升高,硫在气相中的分布明显增加,而液相中的硫略有增加。其主要原因在于黄铁矿硫热解释放的主要温度区间是 450~650 °C^[9],大量的黄铁矿发生还原反应生成 H₂S。此外,随着温度的升高,煤中较易脱除的脂肪族硫醚、硫醇等结构得到释放;而

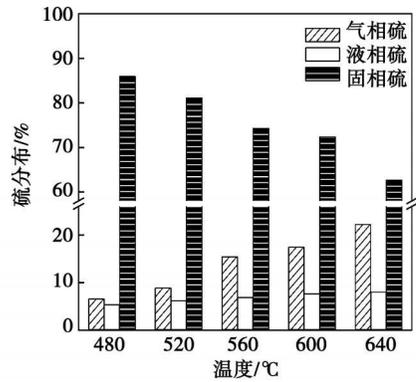


图 5 热解反应温度对硫分布的影响(惰性热载体)

以 CFB 锅炉循环灰作为模拟热载体,当循环灰与煤的质量比为 5 时,温度对热解产物中硫分布的影响如图 6 所示。由图 6 可见,热解温度由 480 °C 升到 640 °C,脱硫率由 4.6% 升到 10.8%,其中气相硫从 0.9% 升到 5.2%。与图 5 比较可见,由于固硫反应的发生,在循环灰存在下煤的脱硫率明显下降。480 °C 时,脱硫率由惰性热载体下的 11.9% 降低到 4.6%; 640 °C 时,脱硫率由 30.2% 降低到 10.8%。可以预测在炉前低温干馏系统的干馏炉中,循环灰的存在可以起到显著的固硫作用,煤热解的气、液产物中约 60%~70% 的硫被固定于灰中,可以有效地降低热解过程中硫的释放量。

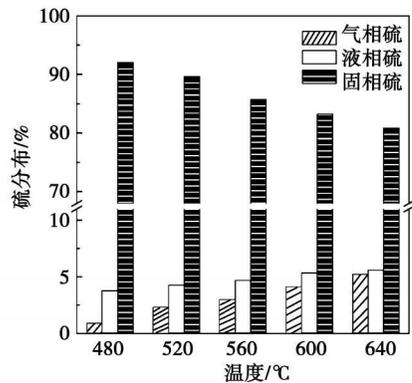


图 6 热解反应温度对硫分布的影响(CFB 循环灰热载体)

3 技术难点及解决方案

在陕西府谷恒源电厂的资助下,煤处理量为 5

7t/h 的干馏系统与蒸发量为 75 t/h 的 CFB 锅炉系统的联合运行试验正在进行, 并已取得了初步的试验结果, 其工艺流程如图 7 所示。针对 CFB 燃烧 煤热解多联产工艺的要求以及存在的问题进行过程开发, 其目的在于为中试过程以及工业试验的设计、研究和开发提供依据。与锅炉对接的中试装置是由多个过程集成起来的复杂系统, 在中试装置的设计、运行过程中, 需要对影响系统稳定运行的各因素进行考察和分析, 结合工艺过程开发中的关键技术问题以及前期的研究结果重点考虑以下几个方面。

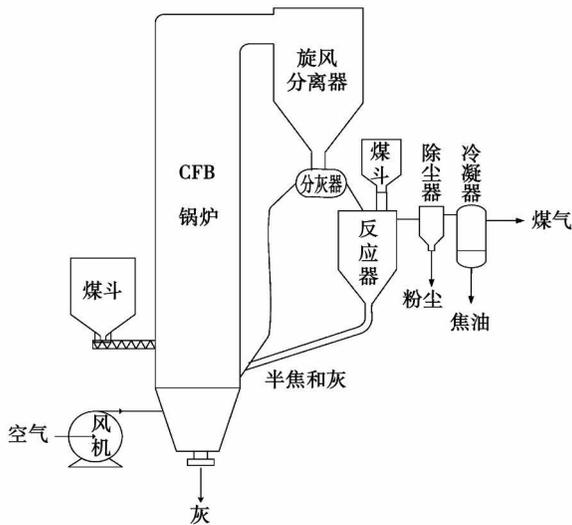


图 7 CFB 燃烧 煤热解多联产工艺流程示意图

3.1 灰的分配

热解用煤可通过给煤绞笼定量输送。而来自锅炉旋风分离器的循环热灰输送量大、温度高、部分用作热载体外其余部分需要返回锅炉炉膛, 在实验室研究的基础上, 与太原锅炉厂合作设计了组合式 U 型返料器。根据热解处理煤量和灰煤比来确定进入热解反应器的灰量和返回锅炉炉膛灰量二者之间的比例。如图 8 所示, 在 CFB 旋风分离器料腿下端接组合式 U 型返料器, 一侧直接返回炉膛, 另一侧进入移动床热解反应器, 通过松动气量控制灰的输送量。

3.2 反应器内的压力

如果热解气体的导出系统(包括热解煤气导出管路、颗粒床过滤器、焦油冷却系统设备及管路)发生故障, 导致热解反应器压力升高, 也会影响系统的稳定运行。情况严重时会导致热解气体窜入 U 型返料器, 影响返料量及破坏旋风分离器下料腿的料封。所以一定要监控热解反应器内的压力变化, 并在热解系统的煤气出口使用引风机确保热解气顺畅

排出。当热解反应器内的压力高于设定值, 需要及时将 CFB 锅炉与热解反应器断开, 锅炉继续正常运行, 干馏系统进行事故处理。同时在热解反应器的上方增设防爆阀。

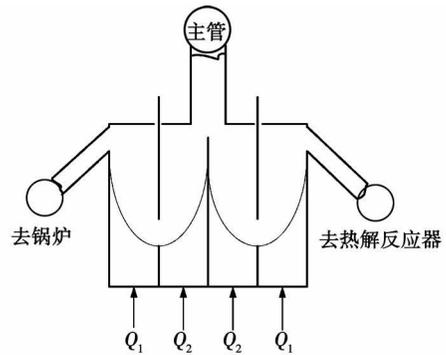


图 8 组合式 U 型返料器示意图

3.3 平衡关系分析

CFB 锅炉燃烧系统和煤热解系统相互独立又相互关联, 保证系统稳定运行的同时不能影响锅炉的正常发电, 因此需要对整个系统的物料平衡、能量平衡以及压力平衡的关系进行分析。

(1) 进入热解反应器的灰量以及直接返回炉膛内的灰量与总循环灰量之间的平衡, 三者之间的关系为 $G = G_D + G_R$ 其中 G —总循环灰量; G_D —进入热解反应器的灰量; G_R —直接返回炉膛内的灰量, 所以要根据需要调节进入热解反应器以及直接返回锅炉炉膛的灰量;

(2) 由于移动床热解反应器要维持一定的料位高度, 因此进入热解反应器的灰量、煤量与返回锅炉炉膛内的半焦、灰之间存在平衡关系;

(3) 为了不影响锅炉的正常发电, 锅炉需要补充的煤量 B 和由热解产生的半焦燃烧所提供的热量 Q_{okc} 、作为热载体的循环灰对煤进行热解而消耗的显热 Q_{sh} 存在平衡关系: $B = (M_{coq1p} \times q_{coq1p} - Q_{okc} + Q_{sh}) / q_{ca,b}$ 其中 M_{coq1p} 为锅炉单独运行时消耗的煤量, $q_{ca,b}$ 表示原煤的热值;

(4) CFB 锅炉与热解反应器之间的压力平衡, 在试验过程中要保证锅炉炉膛内的氧化性气体不能窜到还原性气氛的热解室内, 以免发生危险。同时热解反应器内的压力要维持在一定范围内, 确保除尘器和焦油冷却器的平稳运行、热解气体顺畅排出。

4 结 论

基于 CFB 的热、电、油、气多联产工艺是将 CFB

锅炉与煤热解反应系统有机耦合,通过煤的热解—燃烧分级转化实现多种产品的联合生产。本研究以CFB燃烧煤热解多联产工艺过程开发为背景,考察了固体热载体煤热解反应特性,同时对正在进行的多联产中试试验中的关键技术问题进行了探讨。

(1)对于固体热载体煤热解过程,提高热解反应温度气体产出率有所增加,在适宜的反应温度范围内,3种高挥发份烟煤热解焦油产出率达9% (wt)~11% (wt)。由于钙基固硫剂的存在,CFB循环灰具有显著的固硫作用,实验结果表明热解产生的大部分气相硫被固定在灰中,可以有效降低热解过程中含硫化物的释放水平。

(2)CFB燃烧煤热解多联产工艺是一个影响因素较多的复杂过程,燃烧和热解两个系统存在相互的影响和优化匹配问题。结合前期的小试研究及正在进行的中试试验,对工艺过程开发中的关键技术问题进行了探讨并提出了相应的解决方案。

参考文献:

[1] 姚建中,郭慕孙.煤炭拔头提取液体燃料新工艺[J].化学进展,1995 7(3):205-208.

- [2] HU GUO XIN FAN HAO JIE LU YA QIN et al Experimental studies on pyrolysis of Datong coal with solid heat carrier in a fixed bed[J]. Fuel Process Technol. 2001, 69(3): 221-228
- [3] 梁鹏,巩志坚,田原宇,等.固体热载体煤热解工艺的研究与进展[J].山东科技大学学报(自然科学版),2007, 26(3): 32-40
- [4] 岑可法,方梦祥,洛仲决,等.循环流化床热电气三联产装置研究[J].工程热物理学报,1995 16(4): 499-502
- [5] RAMMLER R W LURGIK Synthetic fuels from Lurgi coal pyrolysis[J]. Energy Progress 1982 2(2): 121-129
- [6] SASSA Garrett s coal pyrolysis Process[J]. Chem Eng Prog 1974 70(1): 72-73.
- [7] XU W TOMITA A Effect of coal type on the flash pyrolysis of various coals[J]. Fuel 1987 66(5): 632-636
- [8] BOUDOU J P ESPITALIE J BMER J et al Oxygen groups and oil suppression during coal pyrolysis[J]. Energy & Fuels 1994 8(4): 972-977.
- [9] GRAZYNA G Sulfur transformations during pyrolysis of a high sulfur Polish coking coal[J]. Fuel 1995 74(3): 356-361.
- [10] FRANCISCO G L JUAN A EDWARD H et al Sulfur release during the devolatilization of large coal particles[J]. Fuel 1996 75(5): 585-590.

(编辑 陈滨)

新技术、新工艺

装配质量对轮盘轮缘应力状态的影响

据《Тяжелое машиностроение》2009年4月号报道,在设计和建造以超临界参数工作的汽轮机实践中,动叶叶根肩部与轮盘轮缘的T形榫头连接广泛应用于高温级。但是,这时在轮缘内出现一些应力高度集中的区域:T形槽上部和下部内圆角区域(图示的区域1-3)。从或然率的观点来看,这些区域裂纹是危险的,对于区域1尤其是这样。

在计算榫头连接最危险的临界区域—T形槽上部内圆角应力状态时,考虑到部件相互作用的接触特性,与根据通用近似模型的类似计算比较,应力强度值增加1~2倍。

应力强度由装配质量和接触表面质量决定。借助于减小肩部内的间隙值并增加槽和叶根支承面上的摩擦系数可以减小应力值。

在榫头连接内实现安全公盈的情况下提高了榫头连接的效果。分析了与在肩部区域内安装中间镶块有关的结构保证方案。

由于应力重新分布,榫槽上部内圆角的卸载伴随有叶片肩部区域的加载,在一定的条件下该加载是危险的,它决定了整个连接的强度。因此,产生了确定在临界区域内加载与增加转子寿命的最佳关系的可能性。

(吉桂明 摘译)

conducted. In this connection, the vibration initiation and elimination process of the system and their mechanism were analyzed and the influence of the heating end temperature, cooling end temperature and recuperator on the system performance was also studied. The research results show that the hybrid type travelling wave thermoacoustic engine has a lower vibration initiation temperature than the pure pop type one. With an increase of the cooling end temperature, the vibration initiation temperature of the system will rise accordingly. The recuperator opening diameter has a relatively big influence on the system performance. In the present test, when the recuperator opening diameter was 0.8 mm, the system had a lowest vibration initiation temperature. During the test, a "secondary vibration initiation" phenomenon has also been found. Key words: thermoacoustic engine, pure pop and hybrid type, vibration initiation, vibration elimination, recuperator

对 CFB 燃烧/煤热解多联产工艺过程的开发 = Development of CFB (Circulating Fluidized Bed) Combustion/Coal Pyrolysis Multiple Cogeneration Processes [刊, 汉] / LIANG Peng (College of Chemistry and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, China, Post Code: 266510), QU Xuan, BI Ji-cheng (National Key Laboratory on Coal Transformation, Shanxi Coal Chemistry Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Taiyuan, China, Post Code: 030001), WANG Zhi-feng (Ningbo Branch, Chinese Academy of Weapon Sciences, Ningbo, China, Post Code: 315103) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 278 ~ 282

Self developed was an intermittent type solid heat carrier pyrolysis plant with a self processing capacity of 1 kg coal. Furthermore, with bituminous coal of a high volatile content and quartz sand serving as the raw material and heat carrier respectively, a pyrolysis characteristics evaluation experiment was performed. It has been found that with an increase of the hybrid pyrolysis temperature, the gas productivity can somehow increase. When the pyrolysis temperature is higher than 560 °C, the coal tar productivity can reach 9% to 11% by weight. Through a simulation of the low temperature dry distillation process in the front of the furnace and with Pingshih-originated coal of a high sulfur content serving as raw material, it has been found that the cycling ash exhibits a conspicuous role of sulfur fixation and the majority of gas phase sulfur produced during the pyrolysis process is fixated in ash. In the meantime, in combination with the research achievements made in the earlier period by the laboratory and the ongoing multiple cogeneration pilot test, an exploratory study has been made of the solutions to the key technologies in the development of CFB combustion/coal pyrolysis multiple cogeneration processes, such as combination type U-shaped recycling device, control mode of the pressure in the reactor and establishment of the system equilibrium correlation etc. Key words: coal pyrolysis, combustion, multiple cogeneration, heat carrier, pyrolysis plant

无烟煤细颗粒在 300 MW CFB 锅炉内停留时间分析 = An Analysis of the Residence Time of Anthracite Fine Particles in a 300 MW Circulating Fluidized Bed Boiler [刊, 汉] / YANG Dong, XU Hong, CHEN Hai-ping et al (Education Ministry Key Laboratory on Power Plant Equipment Condition Monitoring and Control, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(3). — 283 ~ 286

Through an analysis of the coal combustion characteristics and structural features of a 300 MW circulating fluidized bed (CFB) boiler first introduced by China, studied was the influence of the specific structures of various parts of the boiler combustion system on the in-furnace residence time of anthracite particles. The method for calculating the residence time in various combustion subsystems was explored, and the in-furnace residence time and burn-out duration of the fine particles in the 300 MW CFB boiler under the BMCR (boiler maximum continuous rating) operating condition were quantitatively calculated. It has been found that a reduction atmosphere predominates the space inside a recycling tube, and the anthracite particles and high temperature materials are mixed in the recycling tube, which lasts 2 minutes, during which the pyrolysis process mainly takes place. This type of structure can greatly promote the ignition and burn-out of anthracite particles. The furnace is considered as the main zone for coal combus-