

流化床中高水分煤的燃烧与排放试验研究*

魏小林***

盛宏至 孙文超 黎军 吴承康
(中国科学院力学研究所)

摘 要

通过在一小型流化床中进行高水分煤的燃烧与排放的试验研究,表明水分含量和空气-燃料比对于高水分煤的燃烧与排放有较大影响。随着水分增加,流化床床温下降,NO_x、SO_x排放量也下降。空气-燃料比存在一最佳值,这时床温最高,而偏离此值,床温下降,随着空气量的增加,NO_x、SO_x排放量也增加。当空气-燃料比变化时,燃烧干煤与燃烧高水分煤有着类似的试验结果。

关键词: 水分, 煤, 流化床燃烧

The Combustion and Emission Characteristics of High Moisture Coal in FBC

Wei Xiaolin Sheng Hongzhi Sun Wenchao Li Jun Wu Chengkang
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

The combustion and emission characteristics of high moisture coal have been studied in a fluidized bed reactor. The results indicate that the moisture and the air-fuel ratio have significant effect on the combustion and emission of high moisture coal. With increasing moisture, bed temperature and NO_x, SO_x emissions decrease. The air-fuel ratio has an optimal value, at which the bed temperature is maximum. With increasing the ratio, NO_x and SO_x emissions increase. For the combustion of dry coal, the results with varying air-fuel ratio are similar to those for the combustion of high moisture coal.

Key words: Moisture, Coal, Fluidized bed combustion

引 言

自然界存在着大量的高水分煤(褐煤)。在煤的加工处理过程中会产生高水分煤(洗煤泥),

* 国家攀登计划资助项目。

** 中国, 北京, 邮编 100080。

商品燃料水煤浆也是高水分煤。高水分煤的高效低污染燃烧对资源的合理利用和环境保护都有重要意义,具有明显的经济和社会效益。

高水分煤在燃烧过程中,由于水分高、热值低,加煤后燃烧温度大幅度下降,难于稳定燃烧,但当水分蒸发后,煤内空隙率较高,固定碳的燃烧速率也高,燃烧比较彻底。流化床内气体与固体颗粒间动量、热量交换剧烈,空气与燃料混合均匀,温度分布也很均匀,燃烧比较稳定。采用流化床燃烧高水分煤时,一般用石英砂作床料,热容量较大,又能防止煤结团,因而床温稳定、燃烧可靠。

流化床燃烧高水分煤的研究已经有多年历史。以往的研究对比表面积、凝聚、结团、结渣等特性方面进行得较多^[1~4],对于水分发生较大变化时,流化床的燃烧稳定性、污染物排放特性等还研究较少。因此,本文对高水分煤在流化床中的燃烧及污染物排放特性进行了研究。

1 试验装置与燃料特性

1.1 试验装置

流化床试验装置系统如图1所示。燃烧室内径为100 mm,悬浮段高度为1050 mm。沿试验段高度布置有若干个小孔,用于测温、取样和加料等。流化和燃烧空气量为 $13\text{m}^3/\text{h}\sim 15\text{m}^3/\text{h}$ 。点火时用燃气升温,燃气量为 $0\text{m}^3/\text{h}\sim 0.5\text{m}^3/\text{h}$ 。给煤量(干煤)为 $1\text{kg}/\text{h}\sim 1.5\text{kg}/\text{h}$ 。

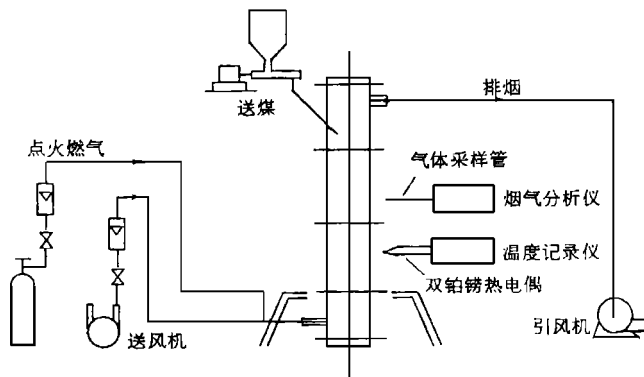


图1 热态流化床试验系统图

点火时,先靠燃气升温,约预热30 min~40 min,床温可达500℃左右,这时床温上升较慢。当温度达600℃左右时,减少燃气量,开始加煤。床温继续上升达800~900℃时,停止燃气就可维持稳定的燃烧。整个点火时间约需1 h。图2是点火期间床温的变化情况。测温热电偶放置在布风板上100 mm处。待燃烧稳定后,就可测量烟气成分。测量成分的烟气取样孔位于布风板上800 mm处。改变给煤量或给煤水

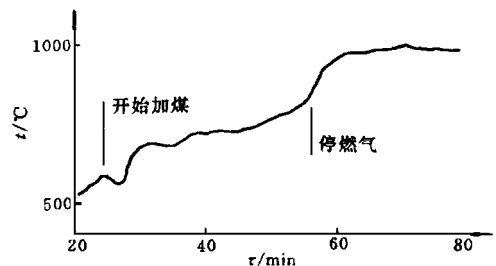


图2 点火过程床温变化图

分,可以测得不同工况下的床温和烟气成分。

1.2 试验物料

试验研究中所用煤种为烟煤和无烟煤,煤质分析如表 1 所示,两种煤具有不同的挥发份、氮、硫含量。干煤的粒径为 1 mm ~ 8 mm。试验时,将干煤粉加不同量的水制成高水分煤,其粒径为 0 mm ~ 5 mm。床料采用河砂,粒径为 0.5 mm ~ 1.0 mm。

表 1 煤质分析表

| 煤 种 | 发热量 $Q_{\text{net, ad}}$ kJ/kg | 工业分析/% | | | 元素分析/% | | | | |
|-----|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | V_{ad} | W_{ad} | A_{ad} | C_{ad} | H_{ad} | O_{ad} | N_{ad} | S_{ad} |
| 烟 煤 | 27600 | 29.72 | 1.66 | 14.12 | 70.83 | 3.68 | 7.75 | 0.81 | 1.15 |
| 无烟煤 | 24560 | 12.10 | 2.50 | 22.88 | 68.58 | 3.07 | 0.95 | 0.94 | 1.08 |

2 试验结果与分析

2.1 水分含量对煤燃烧及排放特性的影响

高水分煤在流化床中燃烧时,水分含量对床温有较大影响,图 3 是不同水分煤燃烧时的床温变化情况。从图中可见,水分为 25% 时燃烧相当稳定,但当水分为 60% 时,床温下降很多,燃烧出现不稳定,需加少量煤气助燃。

水分对燃烧的主要影响是水分蒸发将延迟煤的着火时间,从而引起床温的较大波动^[5]。如果在初始床温较低(800 左右)时,投入水分过高的燃料,将会引起床温较大的波动。然而水分蒸发的时间一般在几十秒内,这比煤在流化床中的停留时间要小得多,因此只要床温的波动不致引起灭火,那么高水分煤在流化床内是可以正常燃烧的。

另外,高水分煤燃烧时,水分是以蒸汽状态随烟气排出炉外的,这些蒸汽带走了燃料中一部分热量。为了减少蒸汽能量损失,希望高水分煤中的水分含量不要太高。若实际生产中产生的高水分煤水分过高(如洗煤厂产生的洗煤泥水分含量可能高达 70%),则可以通过脱水处理来降低水分。一般水分含量在 30% 左右的高水分煤可以保证较高的能源利用率,同时也容易维持燃烧稳定。

由于试验流化床截面积很小,砂床蓄热有限,而相对散热面积及扬析损失很大,因此在燃烧水分为 60% 的煤时需加少量煤气助燃,事实上燃烧这样高水分的煤也不划算,会造成大量的排烟损失,运行中燃烧也不容易维持稳定。在实际处理这样的高水分燃料时,应该进行机械脱水处理。

水分对污染物的排放也有较大影响,如图 4 所示,在相同的空气-燃料比下,高水分煤的 NO_x 、 SO_x 排放量随水分增加而减少。这种现象由两个因素决定。一个因素是温度,在相同空气-燃料比下燃烧高水分煤时,床温偏低,这时燃烧速率小,床层内焦炭和 CO 含量较高,致使 NO 还原成 N_2 的作用增强^[6]。虽然在流化床燃烧温度下热力型 NO_x 生成量小,但随着温度下降,热力型 NO_x 生成量仍呈减少趋势,同时温度较低时, NH_3 等成分氧化成 NO 的速率也减缓,故总的 NO_x 排放量减少。另一个因素是床内气体成分的影响。假设煤中 N 挥发释放后主要成分为 NO 和 NH_3 , 则 NO 的最终排放量由以下反应决定^[6]:

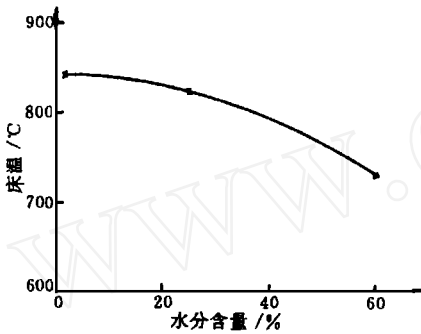


图3 煤中水分含量对床温的影响

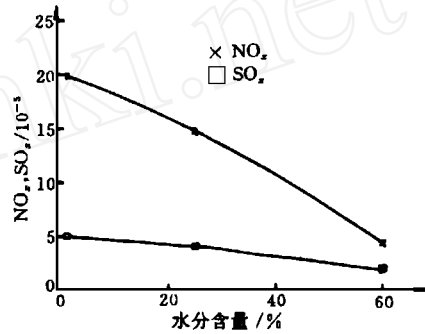


图4 煤中水分含量对污染物排放的影响

由以上方程可见, NO 生成后, 其还原反应不但与焦炭进行, 而且还与 CO 和 H₂ 进行。在燃烧高水分煤时, 会发生反应 $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$, 使得烟气成分中 CO 和 H₂ 浓度增加(如在试验中测得 1.6% 水分煤燃烧时, CO 排放浓度为 3.580×10^{-3} ; 而 25% 水分煤燃烧时, CO 排放浓度为 8.460×10^{-3}), 这会引起方程(1)和方程(3)的反应加快, 致使 NO 还原成 N₂ 的反应增加, 故燃烧高水分煤时, 总的 NO_x 排放量减少。

在试验时主要研究水分对燃烧与排放的影响, 因此煤中未加石灰石进行脱硫试验研究。结果表明, 随水分增加, SO_x 的排放浓度下降(见图4)。

2.2 燃烧高水分煤时空气-燃料比对燃烧与排放的影响

为了保证流化状态的稳定, 流化风量在试验中基本固定, 通过调节给煤量来研究空气-燃料比对流化床燃烧与排放特性的影响。试验中煤的水分含量为 25%, 煤种为烟煤。

图5是空气-燃料比对床温的影响, 可见空燃比有一最佳值(1.40), 这时床温最高, 而偏离此值, 床温下降。

图6是空气-燃料比对 CO 排放的影响, 随空气量减少, CO 排放浓度急剧增加, 空燃比为 0.95 时, CO 排放高达 4.25×10^{-2} , 这时燃烧状况明显恶化。

图7是空气-燃料比对 NO_x、SO_x 排放的影响,

随着空燃比的增加, NO_x 排放浓度也逐渐增加。由于空气量过多时, 床温有所下降(见图5), 因而 NO_x 排放浓度增加的趋势在高过量空气时有所减缓。SO_x 排放浓度随空燃比的增加

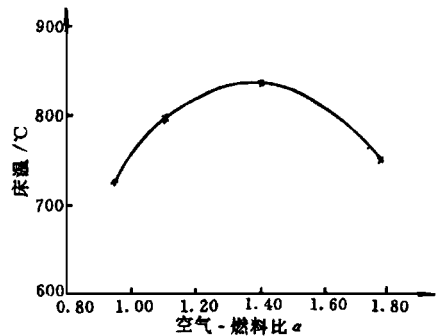


图5 燃烧 25% 水分煤(烟煤)时空气-燃料比对床温的影响

而逐渐增加

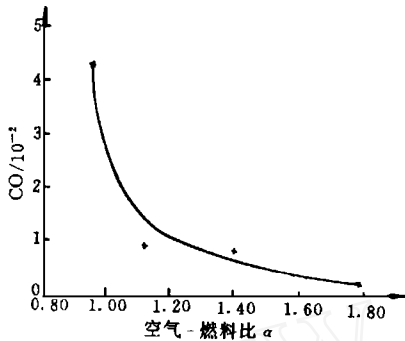


图 6 燃烧 25% 水分煤(烟煤)时空气-燃料比对 CO 排放量的影响

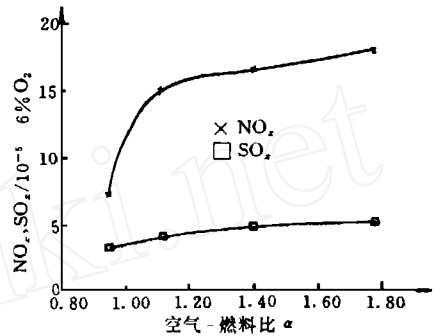


图 7 燃烧 25% 水分煤(烟煤)时空气-燃料比对 NO_x, SO_x 排放的影响

2.3 燃烧无烟煤(干煤)时空气-燃料比对燃烧与排放的影响

为了考察不同煤种对燃烧和污染物排放的影响,进行了燃烧无烟煤(干煤)的试验,试验时仍保持流化空气量不变,通过改变给煤量来研究空气-燃料比对燃烧与排放特性的影响。

图 8 是空气-燃料比对床温的影响,可见空燃比在 1.55 时床温最高,偏离此值,床温下降。

图 9 是空气-燃料比对 NO_x、SO_x 排放的影响,随着空燃比的增加,NO_x、SO_x 排放浓度增加。图中还给出了烟煤(干煤)的试验结果,对比可见,烟煤的污染物排放浓度比无烟煤要大,这是由于煤质特性不同造成的结果。

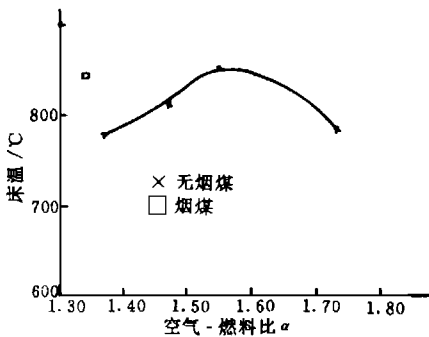


图 8 燃烧无烟煤(干煤)时空气-燃料比对床温的影响

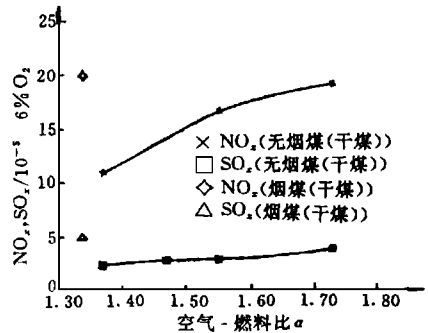


图 9 燃烧无烟煤(干煤)时空气-燃料比对 NO_x, SO_x 排放量的影响

3 结 论

在流化床中燃烧高水分煤的试验表明:适当水分的高水分煤在流化床中可以稳定燃烧。水分和空气-燃料比对于高水分煤的燃烧和排放有较大影响,水分含量增加时,流化床的床温下降,而 NO_x、SO_x 等污染物排放量也下降。当燃烧含有 25% 水分的煤,空气-燃料比为 1.40 时,

床温最高,随着空气量的增加, NO_x 、 SO_x 等污染物的排放逐渐增加。若燃烧干煤(无烟煤),空燃比为1.55时,床温最高。

致谢:本文研究工作得到了国家科委攀登计划项目支持,作者在此表示感谢。在实验工作中,陈丽芳、何蔚琅、满秀芬老师及田文栋、樊未军、郝全华等同志给予了帮助,作者也在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 Lanause R D, et al Fluidized Combustion of Coal Washery Wastes, Fluidization Edited by Grace J R and Marsen J M, 1980
- 2 Pourkashanian M, et al The Combustion of Coal-Water Slurries The Proceeding of the First European Conference on Coal-Liquid Mixtures, Cheltenham, U K, 1983
- 3 A rena U, et al Coal-Water Slurry Utilization in Fluidized Bed Combustion The Proceeding of the 7th International Symposium on Coal Slurry Combustion and Technology, Orlando, Fla, 1984
- 4 倪明江, 罗卫红, 黄国权等. 煤水混合物在流化床燃烧过程中的凝聚结团现象. 浙江大学学报, 1986, 20 (6): 38~ 45
- 5 岑可法, 倪明江, 黄国权等. 煤水混合物沸腾燃烧技术的前景. 浙江大学学报, 1985, 19 (4): 1~ 7
- 6 Chan L K, Sarofin A F, Beer J M. Kinetics of the NO-Carbon Reaction at Fluidized Bed Combustion Conditions Combustion and Flame, 1983, 52: 37~ 45
- 7 Johnson J E A kinetic Model for NO_x Formation in Fluidized Bed Combustion The Proceeding of the 1989 International Conference on FBC. 1989. 1111~ 1118