0254-6124/2011/31(5)-635–05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Yu Qiang, Ai Guozhi, Wu Le, Xu Minghou. Development of the microgravity experimental device for pulverized coal combustion. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(5): 635-639

微重力煤粉燃烧实验装置的研制

于 强[1] 艾国志[1,2] 吴 乐[3] 徐明厚[3]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

3(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室 武汉 430074)

摘 要 介绍了一种空间煤粉燃烧实验装置, 用于研究微重力条件下煤粉颗粒群的热解、气化、着火、挥发分的析出与焦碳燃烧及其燃尽等燃烧特性. 采用间断式喷入方式, 当炉膛内温度达到设定值时, 将煤粉通过一定氧气比例的空气喷入, 观察并记录煤粉在炉膛中的燃烧过程. 燃烧完成之后, 测量燃烧产物中的气体成分和含量. 给出了利用该装置在地面进行煤粉燃烧实验的结果. 详细介绍了该实验装置的系统构成、工作原理、工作过程, 并提出了进一步改进的方案.

关键词 微重力燃烧, 煤燃烧, 着火点测量

中图法分类号 V 524

Development of the Microgravity Experimental Device for Pulverized Coal Combustion

YU Qiang[1] AI Guozhi[1,2] WU Le[3] XU Minghou[3]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan* 430074)

Abstract A facility that can be used for pulverized coal combustion experiment in microgravity is described. It is used to study pulverized coal particles' pyrolysis, gasification, ignition, volatile release, char combustion and burnout, and other combustion characteristics in microgravity. The pulverized coal is blown into the furnace chamber intermittently. When the temperature reaches the set point, turn on the valve and put pulverized coal into the furnace chamber, and then observe whether pulverized coal can be ignited so as to determine the ignition temperature of pulverized coal. By detecting the coal gases in the combustion, the volatile changes in precipitation of char combustion and the burnout characteristics can be attained. The flame structure and flame temperature distribution can be recorded by CCD image. The structure, the working principle and the experimental results of this facility are introduced. Further improvements of the facility are presented.

Key words Microgravity combustion, Coal combustion, Measurement of ignition point

2010-03-09 收到原稿, 2011-04-22 收到修定稿

E-mail: yuqiang@cssar.ac.cn

1 引言

研究在微重力条件下煤粉颗粒群的热解、气化、着火、挥发分的析出与焦碳燃烧及其燃尽等特性, 可以更好地掌握各种燃烧设施中的燃烧过程, 达到节约能源, 减少燃烧过程污染物的排放, 建立支持国民经济可持续发展生态环境的目的 [1].

1994 年, 日本为研究清洁高效并且可以循环利用 CO_2 的煤粉燃烧技术 (氧气/循环烟气燃烧技术), 进行了微重力下单颗粒煤和煤粉的燃烧实验研究 [2]. 中国的微重力煤燃烧研究近期才逐步开展, 2007 年, 清华大学利用中国科学院国家微重力实验室的 3.5 s 落塔, 率先开展了微重力下单颗粒煤的着火研究 [3].

由于空间实验条件的限制, 空间燃烧实验装置要求温度高、气密性好、功率低, 而又体积小、质量轻, 以往的实验装置难以实现煤粉在高温下的燃烧 [2−5]. 已有空间微重力煤燃烧研究大多集中于单颗粒煤的燃烧, 仅有的煤粉燃烧实验是在球形装置内利用电阻丝点火进行火焰传播速度的测定, 而不能进行高温下的煤粉着火温度、燃尽、污染物排放等方面的研究. 本项研究即是为实现空间煤粉燃烧实验而开展的.

在微重力环境中观察煤粉的燃烧, 并确定其着火点 (开始燃烧时的温度), 通过 CCD 观察记录火焰图像, 研究火焰的结构和温度场的分布, 研究煤粉的燃烧特性、煤粉燃烧过程污染物排放特性、燃烧特性和污染物生成的影响因素, 是空间实验的重要目的. 这里着重研究实现该目标的方法.

2 工作原理及技术指标

煤粉给入后, 其着火时所对应的温度定义为该粒度煤粉的着火温度. 研究煤粉的着火温度时, 需要控制炉内温度, 使其逐步升高, 在不同的温度下将煤粉送入炉膛, 然后观察煤粉是否燃烧, 以此来确定煤粉的着火温度.

由于微重力环境下空间试验条件的限制 [3−5], 传统的沉降炉, 热重不能用于空间实验 [6−8], 因此需要设计专用的空间煤粉燃烧实验装置. 通过检测煤粉在燃烧过程中气体的析出变化来判断挥发分的析出、焦碳的燃烧及其燃尽等燃烧特性, 结合高速摄像可监视煤粉的燃烧过程.

控制给粉系统 (不同储粉罐), 可改变不同煤粉的颗粒数 (煤粉浓度) 和粒径, 从而研究影响煤粉着火、燃烧和污染物排放特性的因素, 并通过 CCD 观察、记录火焰图像来研究火焰的结构和温度场的分布.

要实现上述目标, 实验装置需要具备以下功能: 给粉和进气、排气, 气体成分测量, 温度控制, 观察、记录并传送图像和数据.

实验装置的主要性能指标如下.

给粉方式: 间断式.

输粉介质: 空气.

吹送气体初压: 约 1.5 atm.

风粉浓度: 每公斤气体中约 0.2 kg 煤粉.

停留时间: 煤粉喷入后约在 1∼2 s 内即燃烧完.

炉型: 微型单温区高温不锈钢电阻炉.

加热炉长: 80 mm.

炉膛供电电压: 28 V.

炉丝电阻: 4.35 Ω.

功率: < 200 W.

重量: < 6 kg.

体积: < 300 mm $\times$ 300 mm $\times$ 300 mm.

测温热电偶型号: K 型镍镉镍硅热电偶.

炉膛最高温度: 950°C.

温度精度: ±1°C.

3 实验装置的构成

空间煤粉燃烧实验装置主要由透明的炉体单元、进出气给粉单元、烟气分析单元、观察单元及控制单元组成, 如图 1 所示. 透明的炉体单元用来提供燃烧煤粉所需的环境, 进出气给粉单元用于控制煤粉的喷入和废气的排出, 烟气分析单元用于测量排出气体中

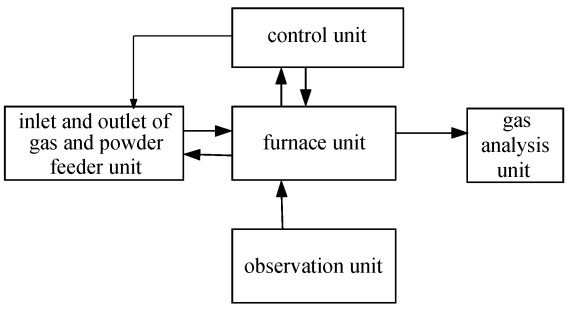


图 1 空间煤粉燃烧实验装置系统工作原理

Fig. 1 Scheme of the facility

的气体成分及浓度, 观察单元用于观察记录炉膛内的煤粉着火过程, 控制单元用于控制炉膛中的温度和给粉、排气.

3.1 透明观察炉

炉体单元主要由炉膛、加热元件、热电偶、保温层、辐射层和外壳组成. 筒体采用 ϕ30 mm × 80 mm 的不锈钢管. 加热元件采用螺线管式布置的镍铬铝电阻丝. 沿炉膛轴向分布 5 支 K 型热电偶, 中间的热电偶安装在炉膛内部, 用于测量炉膛内部的温度, 其测量的是煤粉直接感受到的温度, 更加接近煤粉颗粒实际温度. 在其两侧各有 2 支热电偶, 均安装在炉膛外壁上的加热电阻丝旁, 如图 2 所示. 炉体正常运行时炉膛内的最高温度控制在 950°C 以下. 炉膛外是保温层和反射屏. 外壳材料采用铝材, 用来固定和保护炉膛及保温材料. 在炉膛的两端, 各安装了 1 片石英玻璃. 在炉体的两端, 也分别安装了 1 片石英玻璃. 这样, 从炉体的两端可以观察到炉膛内煤粉燃烧的情况.

3.2 进出气给粉单元和烟气分析单元

进出气给粉单元如图 3 所示, 其由气瓶、阀门 1、阀门 2、阀门 3、煤粉罐组成. 阀门 1 和阀门 2 用于控制进粉量. 阀门 3 用于控制废气的排放, 同时调节炉膛中的压力. 烟气分析单元中安装有气体浓度和成分传感器, 可测量排出气体的成分和浓度. 抽气系统用于排出炉膛和烟气分析单元中的残余气体, 以在实验之前创造一个干净清洁的实验环境.

3.3 观察单元

目前在地面上进行实验时, 观察单元中使用的是德国 Blaser 公司生产的面阵摄像头和 COMPUTAR 公司 MLM-3X-MP 的镜头组合, 它的帧频为 210 frame/s, 分辨率为 648 pixel × 488 pixel, 像素为 7.4 μm × 7.4 μm. 利用该观察设备的高速采样功能, 能够详细记录煤粉着火的过程, 为科学研究提供详细的图像数据.

3.4 控制单元

控制单元为一个基于 8051 单片机的控制系统 (见图 4), 可对整个实验过程实施控制, 具有给粉

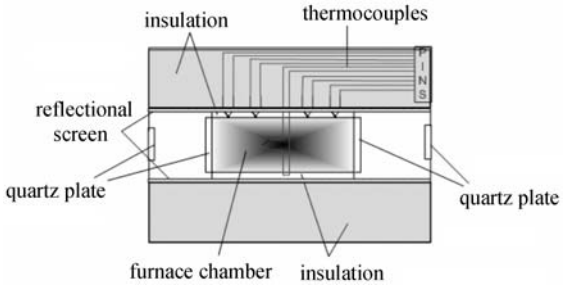


图 2 煤粉燃烧炉炉体

Fig. 2 Furnace unit

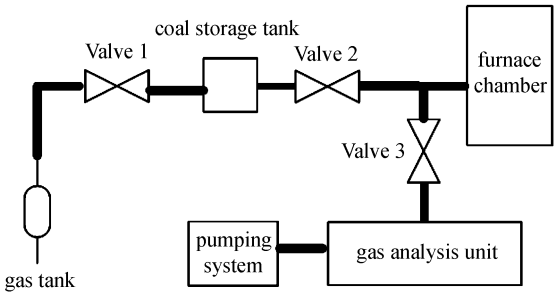


图 3 进出气给粉单元和烟气分析单元

Fig. 3 Inlet and outlet of gas and powder feeder unit and the gas analysis unit

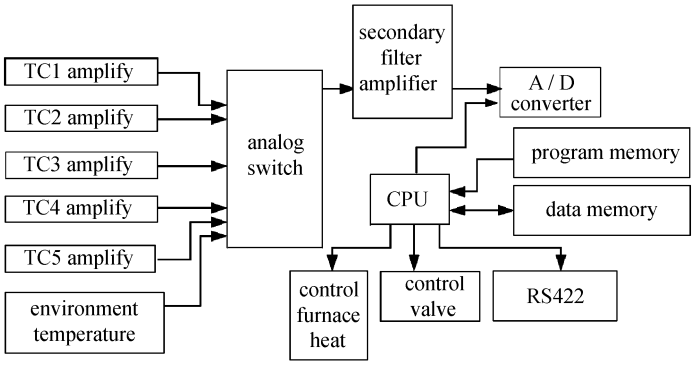


图 4 控制单元

Fig. 4 Control unit

控制、排气控制、温度控制、数据采集和存储、数据传送等功能.

控制系统由信号放大电路、模拟开关、A/D 转换、CPU、数据存储器、程序存储器、RS422 通信接口、炉丝控制、电磁阀控制等电路单元组成.

炉体加热时, 热电偶将实时测量炉膛温度, 其输出的模拟电压信号进入电路系统之后, 先进入放大器, 然后经过模拟开关. 从模拟开关出来之后进入二级滤波放大器, 最后进入 A/D 转换器进行 A/D 转换, A/D 转换出的数据输出到 CPU 的数据总线上. 热电偶的冷端温度使用半导体温度传感器 AD590 测量. 由热电偶的测量值和 AD590 的测量值可得到热电偶热端的温度. 在 CPU 控制下, 温度数据存入数据存储器中, 并通过 RS422 接口将温度数据发送给上位机. 系统使用 PID 控制算法对炉温进行控制. 当炉温达到设定温度值时, CPU 控制电磁阀 1 和电磁阀 2 打开, 将煤粉喷入炉膛. 实验完成后, 控制电磁阀 3 打开, 使燃烧生成产物排入烟气分析单元, 然后测量烟气分析单元中传感器的信号, 得到烟气成分和浓度.

4 工作过程

实验前将煤粉和所需气体按计算得到的比例分别储存在气瓶和储粉罐中, 气瓶中的气压为 4 个大气压. 初始时, 阀门 1、阀门 2、阀门 3 全部关闭. 将阀门 3 打开, 抽气系统运行, 将炉膛、烟气分析单元中的废气抽走; 3~4 s 后, 抽气系统停止抽气, 关闭阀门 3. 当炉膛内温度达到设定温度后, CCD 相机开启, 阀门 1 和阀门 2 同时打开, 煤粉和试验气体被压入炉膛内, 煤粉在炉膛内燃烧. 此时可通过炉子两端的透明窗口, 观察及记录煤粉在炉膛中的燃烧情况. 燃烧完成之后, 阀门 3 打开, 将燃烧产物排入烟气分析单元, 测量气体成分和浓度.

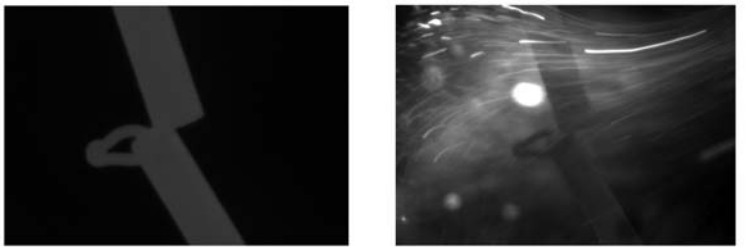
5 实验结果

在一定的空气条件下, 采用粒径 106~150 μm 的褐煤进行着火实验. 煤粉着火点实验过程如图 5 所示. 进行着火点实验时, 先将炉膛加热到一定温度 (图 5 所示的实验炉膛温度为 743°C), 然后煤粉由气体吹入, 煤粉在炉膛内被加热燃烧. 图 5(a) 所示为煤粉吹入之前炉膛内的情形, 此时炉膛内温度为煤粉着火点对应的温度区域. 热电偶被安放在炉膛中间, 热电偶丝穿在磁管之中, 以防止热电偶丝与炉膛壁短路. 图 5(b) 所示为煤粉被吹入瞬间在炉膛内的燃烧情形. 由于有充分的空气对流, 挥发分首先燃烧, 此时有明显的火焰出现. 热电偶可以将此时的温度实时记录下来.

由前面分析可知, 此煤粉燃烧实验装置可以清楚地观察和记录煤粉整个的燃烧过程, 进而完成煤粉燃烧实验.

6 结论

本实验装置可以较为精确地实现煤粉着火温度的测量. 由于温度传感器直接装在煤粉燃烧的炉膛内, 较之使用滴管炉实验仅能测得炉膛外壁温度 [8−9], 本装置可以更为直接、准确地测量到煤粉的着火温度.



(a) before the powder is blowed in (b) pulverized coal is burning in the furnace

图 5 煤粉着火点实验

Fig. 5 Images of ignition point

另外, 本装置可实现煤粉的喷入, 使煤粉快速加热升温, 较之热重分析法 [10], 能更准确地模拟电厂中的实际运行情况. 用其进行的多次实验结果表明, 所测量的煤粉着火点较为准确, 这为研究煤粉的燃烧特性提供了有力的工具.

由于条件限制, 本装置尚存需改进之处, 主要为以下两个方面.

(1) 不能准确获得送入炉膛的煤粉浓度, 而煤粉浓度是影响着火温度的一个重要因素. 该问题将会采用实验测量和理论计算的方法解决. 主要是获得气压和阀门打开时间与煤粉输入量的关系.

(2) 目前实验装置不能完全密封, 通常实验时炉膛内气体压力大于外界大气压, 为正压环境, 外界空气不会进入炉膛, 因此实验条件可以保证不变. 为了获得更为准确的实验结果, 未来应该对装置采用密封设计.

参考文献

[1] Xu Minghou, Zheng Chuguang, Feng Rong, Qiao Yu, Yan Rong. Overview of trace elements research in coal combustion process [J]. *Proc. CSEE*, 2001, **21**(10):33-38. In Chinese (徐明厚, 郑楚光, 冯荣, 乔瑜, 晏荣. 煤燃烧过程中痕量元素排放的研究现状 [J]. 中国电机工程学报, 2001, **21**(10):33-38)

[2] Katalambula H, Hayashi J, Chiba T, *et al.* Dependence of single coal particle ignition mechanism on the surrounding volatile matter cloud [J]. *Energy Fuels*, 1997, **11**:1033-1039

[3] Zhu M, Zhang Hai, Tang Gentu, *et al.* Ignition of single coal particle in a hot furnace under normal-and microgravity condition [R]//Thirty-Second Symp (Int) on Combustion. Montreal: Proceedings of The Combustion Institute, 2009

[4] Zhang Xia. Research advances on microgravity combustion [J]. *Adv. Mech.*, 2005, **34**(4):507-528. In Chinese (张夏. 微重力燃烧研究进展 [J]. 力学进展, 2005, **34**(4):507-528)

[5] Liu Chunhui, Cai Ze, Chen Tianyi. Microgravity combustion experiment facility and burning flame observation [J]. *Mis. Space Vehic.*, 1996(222):40-46. In Chinese (刘春辉, 蔡泽, 陈天翼. 微重力燃烧试验设备与燃烧火焰观测 [J]. 导弹与航天运载技术, 1996(222):40-46)

[6] Ma Zhengzhong, Jiang Fan, Xu Xiang, Xiao Yunhan. Development progress and characters of drop-tube furnace technology [J]. *Clean Coal Tech.*, 2009, **15**(4):71-75. In Chinese (马正中, 姜凡, 徐祥, 肖云汉. 滴管炉技术特点及其研制进展 [J]. 洁净煤技术, 2009, **15**(4):71-75)

[7] Wang Chunlin, Yang Jianguo, Weng Shanyong, *et al.* Analysis and experiment of ignighting characteristic of main power coal in China [J]. *Boil. Tech.*, 2004, **35**(6):48-51. In Chinese (王春林, 杨建国, 翁善勇, 等. 我国主要动力用煤的着火特性试验及分析 [J]. 锅炉技术, 2004, **35**(6):48-51)

[8] Hu Wenbin, Yang Hairui, Lü Junfu, Yue Guangxi, Zhang Jiansheng. Study on ignition properties of coals by using thermogravimetry [J]. *Power Sys. Eng.*, 2005, **21**(2):8-12. In Chinese (胡文斌, 杨海瑞, 吕俊复, 岳光溪, 张建胜. 煤着火特性的热重分析研究 [J]. 电站系统工程, 2005, **21**(2):8-12)