

柴油、渣油和沥青的脉动燃烧对比试验研究

涂建华, 陈福连, 王勤勇

(浙江工业大学 能源与动力研究所, 浙江 杭州 310014)

摘要: 在一变形的里克(Rijke)管中进行了柴油、渣油和沥青的脉动燃烧对比试验。试验发现容易燃烧的燃料容易激起脉动, 难燃燃料由于着火推迟, 较难激起脉动, 而必须加长尾管长度才能解决问题。当进风面积与燃烧腔截面积之比减小到一定程度时, 对于渣油等难燃燃料, 其脉动特性会向 $1/4$ 波长管的脉动特性过渡; 而对于柴油等易燃燃料, 脉动特性不变。试验表明, 这种无阀脉动燃烧技术可使渣油、沥青等难燃物高效清洁地燃烧, 这对于渣油等难燃燃料的利用有重要意义。

关键词: 脉动燃烧; 脉冲燃烧; 渣油; 里克(Rijke)管

中图分类号: TQ038; TK172 文献标识码: A

1 前言

脉动燃烧是一种新型的高效低污染燃烧方式, 其基本特征是燃烧装置内部存在高强度的压力脉动, 压力脉动的振幅高达 $2 \sim 10$ kPa, 声压级在 $140 \sim 170$ dB, 频率单一, 一般为 $20 \sim 150$ Hz。有的文献也称脉冲燃烧或振荡燃烧^[1]。有研究表明, 在如此强烈的声波作用下, 燃烧和传热传质过程会得到明显的强化, 而污染物的排放明显降低。Zinn 等在 Rijke 型脉动燃烧装置中对粗颗粒烟煤的燃烧试验, 燃烧效率高达 97% , 燃烧时间缩短 30% , 过剩空气系数只有 $1.05 \sim 1.1$, NO_x 排放只有同温下的非脉动燃烧的一半^[2]。June 等在竖直平板的自然对流传热试验中, 发现当气体在频率为 200 Hz, 声强为 163 dB 的声波作用下, 传热系数为无脉动条件下的 220% ^[3]。大量事实也证明, 高强度脉动用于物料干燥时, 物料的干燥时间将缩短一半, 节能 10% 以上。主要缺点是有噪音, 需要消音装置^[4]。

目前为止, 脉动燃烧技术并没有得到广泛的应用。主要原因是在大尺寸下, 难以获得稳定的高强

度的脉动, 难以适应各种燃料。目前应用的脉动装置都是有阀的。主要以燃气为燃料, 用于锅炉、热风装置、干燥设备等, 阀门制造困难, 使用寿命短。而基于 Rijke 型的脉动燃烧装置虽然不需要阀门, 但长径比要求大于 10 , 难以做成有实际应用价值的燃料设备。为此, 作者等人对 Rijke 管进行了变形改造, 通过两端收缩, 得到了一种介于 Rijke 管和 Helmholtz 共振器之间的过渡型的脉动燃烧装置, 使长径比缩短到 5 以下, 并以煤和柴油为燃料, 进行了大量研究工作, 发现这是一种很有前途的脉动燃烧技术^[5-9]。

渣油是一种难以高效燃烧的燃料, 在工业上应用很广, 但燃烧不完全, 受热面易结焦。Bai 等人在 Rijke 管中的试验研究^[7], 重油雾炬可以激起强烈声振, 6 号重油的燃尽率在 99% 以上, 而强声波本身有除焦作用。因此, 如果在工业规模上采用脉动燃烧

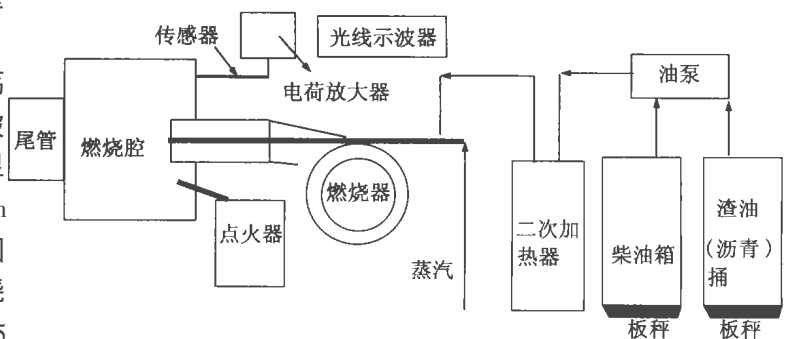


图 1 脉动燃烧试验装置示意图

法燃渣油, 则可以解决渣油燃烧的难题, 有广泛的应用前景。沥青尽管通常不作为燃料使用, 但如果沥青也能高效清洁燃烧, 则沥青拌和炉上可以直接用沥青替代柴油, 大幅度降低燃料成本。

2 试验装置及方法

图 1 是火炬脉动燃烧试验的装置示意图。在该

系统中包括供油系统、蒸汽系统、燃烧器、振荡燃烧腔和测量仪表等组成。所用的燃料分别有 0 号柴油、渣油和 70 号沥青。

供油系统由柴油箱、渣油(或沥青)桶、齿轮油泵、调压阀、过滤器、二次加热器以及若干管路和阀门组成。蒸汽是雾化介质,也用于管路的吹扫和预热。压力为 0.5 MPa 的蒸汽经过调压后进入喷枪。燃烧器由雾化枪、风机、配风器和点火器等组成。雾化枪上的喷嘴为蒸汽雾化的 Y 型喷嘴;配风器为轴向叶片旋流器;点火器为电脉冲与液化气两级点火器;燃烧腔为一变形的 Rijke 管,由直径为 500 mm 的燃烧段和直径为 300 mm 的尾管构成。各段的长度都是可调的。燃烧段开有一排观察孔。燃烧腔内部声压和频率用压力传感器和电荷放大器及光线示波器测量,外部声压用普通的声级计测量。烟气成份未做测量。

烧柴油时非常简单,不需要加热,也不需要吹扫。对于渣油,由于其凝固点为 35 °C, 100 °C 时的粘度达 19.8 E,因此需要两级加热。先在桶内加温到 80 °C~95 °C,后在二次加热器中加温到 110 °C~130 °C,才能雾化燃烧。70 号沥青的软化点为 50 °C 左右,100 °C 时的粘度达 150 E,因此需要加热到更高的温度。试验时一般将沥青一次加热到 140 °C 以上,二次加热到 160 °C 以上。

3 试验结果与分析

3.1 不同燃料燃烧的激振长度

通过调整燃烧段和尾管的长度,作者做了大量的激振试验,发现不同燃料燃烧时其激振条件是不同的,相比较而言,柴油最容易激振,渣油次之,沥青最难。表 1 是其它条件都不变的情况下,三种燃料发生脉动燃烧所需要的尾管长度。

表 1 不同燃料的激振长度与声压频率

尾管长度 /mm	冷段长度 /mm	总长 /mm	总长冷段之比	油量 /kg·h ⁻¹	声压级 /dB	频率 /Hz	
柴油	2 400	800	4 600	5.75	70	164	30
渣油	3 600	1 350	5 500	4.1	65	153	25
沥青	4 000	1 450	5 900	4.1	60	147	24

注:试验油压为 0.2 MPa,汽压为 0.25 MPa,柴油在尾管为 1.9 m 时便能开始激振。

计算冷段长度时,应该从火焰前锋最大截面位置算起。对标准的 Rijke 管,当长径比大于 10,火焰位置位于进风部分 1/4 处,就会发生波长为管长 2 倍的强烈的声振,两端收口后,其频率特性不再遵

从 Rijke 管的规律,而是介于 Rijke 管和 Helmholtz 共振器之间,是一种过渡声腔结构。作者在其它的研究中表明,冷段与总长的长度比不是 1/4,而是 1/4~1/9 之间。对于柴油,其火焰较短,冷段长度较短;而对于渣油,着火相对困难,火焰长,使得实际冷段长度超出了激振的尺度范围,如果不加长尾管长度,就不会发生激振。加长尾管就相当于加长总长,减小冷段与总长的比值。对于该试验装置,烧柴油时的冷段长度约为 0.8 m,烧渣油时为 1.35 m,烧沥青时为 1.45 m,因此烧沥青时要发生激振,其尾管长度要求更长。

3.2 进风口截面与激振的关系

本试验工作开始时使用一台风压为 3.5 kPa 的中压风机,结果烧柴油时能稳定脉动,烧渣油时会发生爆振,后来改用一台风压只有 1 kPa 的风机,则顺利激振,而没有爆振。当小风机风门进一步关小时,会冒黑烟,但不会爆振;烧渣油时由于间隙性地熄火和点火,因此出现强烈爆振。这种情况是要极力避免的。

表 2 冷端收缩比对脉动的影响

	总长 /mm	总长与冷段之比	冷端与燃烧室面积之比/%	频率 /Hz
柴油	4 600	5.75	8.4	30
柴油	4 800	4.8	4	29
渣油	5 500	4.1	8.4	25
渣油	5 900	4.1	4	爆燃

部分结果见表 2。根据作者以往的研究和分析,对于变形的 Rijke 管,自然送风时其频率特性与三段串联管的共振频率相近,因为自然送风时进风管面积是很大的;强制送风时其频率特性接近 Helmholtz 共振器,因为强制送风的进风口面积较小,同 Helmholtz 共振器相似。所以在本例的小风口烧柴油试验中,其频率与过去的研究规律一致。对于烧渣油时的爆燃,爆燃的频率很低,而与 1/4 波长管相近。当然,到目前为止,要准确预测脉动频率还做不到,只能凭经验估计,其中的关键是平均温度的估计,因为音速与温度密切相关。以下是频率估算的经验公式:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{Vle}} \cdot \xi, \text{ Hz}$$

其中: c 是某一假定平均温度下的音速; S 是尾管与进风管的面积之和; V 是燃烧室的体积; le 是尾管与

(下转第 165 页)

和火焰边缘区域的燃烧温度, 测量得到火焰中部最高温度达到 953 °C, 火焰边缘测量值为 219 °C, 此时图像的反演计算结果为火焰中部最高温度为 1 188 K, 边缘为 400 K 左右, 两者能够较好的吻合, 这也说明了我们的截面温度场重建测量方法是有一定精度的。

5 结论

本文分析了利用面阵 CCD 进行火焰截面温度测量的基本原理, 在对介质的辐射特性作了简化之间建立了模型并采用了遗传算法进行求解。对测试系统进行了数值模拟计算并在油煤混烧实验炉上进行了测试试验, 给出了计算和测量的结果。

参考文献:

- [1] WANG DEZHONG. Visualization and measurement of fuel spray by means of laser computed tomography, in *Modern Measuring Techniques For Multiphase Flows* [M]. Beijing: Southeast Univ Press, 1995.
- [2] SCHWARZ A. Multi-tomographic flame analysis with a schlieren appa-

ratu[s] J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7(4): 406—413.

- [3] 周怀春. 基于辐射图象处理的炉膛燃烧三维温度检测原理及分析[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(1): 1—4.
- [4] 薛飞. CCD 计测燃烧室断面温度场的原理研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(5): 390—393.
- [5] 王飞. 运用代数迭代技术由火焰图像重建三维温度场[J]. *燃烧科学与技术*, 已录用.
- [6] 庆天戈. *CT 原理与算法* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [7] 林成森. *数值计算方法(下册)* [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 周金荣. 遗传算法的改进及其应用研究[J]. *控制与决策*, 1995, 10(3): 261—264.
- [9] 孙增圻. *智能控制理论与技术* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [10] FEISK J D, TIEN C L. Calculation of the emissivity of luminous flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1973, 7(3): 25—31.
- [11] 张晓舟. 面阵 CCD 用于目标亮度的测量[J]. *应用光学*, 1995, 16(6): 45—47.
- [12] 刘林华. 国产动力煤粉粒子系的辐射特性[J]. *动力工程*, 1998, 18(3): 65—69.
- [13] 伏岩松. 简单遗传算法的实现[J]. *微型计算机*, 1996, 16(4): 74—76.

(渠源 编辑)

(上接第 160 页)

进风管的有效长度之和; ξ 是与结构有关的经验系数。

$$le = (l + \pi/4\alpha)_{\text{尾管}} + (l + \pi/4d)_{\text{进风管}}$$

3.3 脉动燃烧与非脉动燃烧的比较

通过观察发现, 去掉一段尾管进行非脉动燃烧时, 烧柴油同脉动燃烧一样, 无烟; 烧渣油时有少量青烟, 火焰很长, 窜出管外; 烧沥青时有较大的黑烟, 火焰更长。不脉动时火焰的颜色都较暗, 脉动燃烧时火焰发白, 火焰缩短, 烧渣油和沥青时都无烟。脉动时燃烧段的小孔会窜出火苗, 从尾管观察, 火焰有明显的脉动迹象, 表明用脉动的办法烧渣油和沥青是可行的。

脉动燃烧有噪音, 试验台附近的噪音为 70 ~ 90 dB, 烧柴油的噪音比烧渣油沥青大, 油量大时噪音比油量小时大, 实际应用时有必要采取消音措施。

4 结论

整个试验测量系统比较简陋, 喷嘴的加工精度很差, 尾管长度不能连续调节, 加上脉动燃烧本身的复杂性, 使得数据缺乏精确性, 只能定性地描述得出以下结论:

(1) 脉动燃烧是一种高效清洁的燃烧方式, 可以干净彻底地燃烧渣油和沥青等难燃物质。

(2) 决定冷段长度的不是喷嘴到进风口的距离, 而是火焰前锋面最大直径处到进风口间的距离。冷段长度与总长之比要小于 1/4。

(3) 对于难燃物质如渣油沥青等, 其进风口截面积不能太小, 太小则发生向 1/4 波长管的过渡, 造成频率太低和燃烧不稳定。

参考文献:

- [1] 拉乌申巴赫. *振荡燃烧* [M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] ZINN B T. The reduction of nitrogen oxides emissions from coal burning nijke pulse combustion[A]. *Fall Tech. Meeting of the Combustion Inst. of U. S. A* [C]. Florida: 1990.
- [3] JUNE R R. The effect of sound on free convection heat transfer from a vertical flat plate[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1963, 8(2): 279.
- [4] 潘永康. *现代干燥技术* [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [5] CHEN F L. Rijke-ZT pulse combustion technology lore coal[A]. *Energy and Enviroment Proceedings of the International Conference, ICEE*. 1996[C]. New York: Begell House Inc. 1996. 697—702.
- [6] SHI Z L. Investigation of a square nijke-type pulse combustor for coal [A]. *Third Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization* [C]. Hongkong: Univ of Tech Press 1995.
- [7] BAI T. Combustion of liquid fuels in nijke type pulse combustor[D]. USA: Georgia Tech, 1992.

(渠源 编辑)

content rate of an incident flow cross-section, the shape and characteristic dimensions of a vortex-street generating entity, the direction of incident flow, etc. By utilizing the above-mentioned relation and on the basis of the measured two-phase vortex street frequency it is possible to use the vortex-street generating entity as a measuring element for the measurement of two-phase flow rates and components. **Key words:** gas-liquid mixture, Kaman vortex, Strouhal number, cylinder

切向炉内小分隔屏后涡量分布的实验研究= **Experimental Investigation of the Vorticity Distribution Behind the Small Partition Panel of a Tangentially Fired Furnace** [刊, 汉] / HE Bo-shu, CHEN Chang-he (State Key Lab of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), DIAO Yong-fa, XU Jin-yuan (Energy Source and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 154 ~ 158

A 6-wire vorticity probe was used for the first time to measure the velocity and vorticity distribution behind the partition panel of the cold model of a HG-2008-YM2 tangentially fired furnace. Parameters depicting the characteristics of turbulent flow have been obtained, which include turbulent flow intensity, skewness factor and flatness factor, etc. The presence of a partition panel has a significant effect on the velocity and vorticity field behind it. The test results indicate that a separation vortex has emerged behind the right half panel due to airfoil effects. **Key words:** tangentially fired furnace, partition panel, vorticity, skewness factor, flatness factor

柴油、渣油和沥青的脉动燃烧对比试验研究= **Contrast Experimental Research on the Pulsating Combustion of Diesel Oil, Residual Oil and Asphalt** [刊, 汉] / TU Jian-hua, CHEN Fu-lian, WANG Qin-yong (Energy Source and Power Engineering Research Institute under the Zhejiang Polytechnical University, Hangzhou, China, Post Code: 310014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 159 ~ 160, 165

Contrast tests of pulsating combustion of diesel oil, residual oil and asphalt were conducted in a shape-changing Rijke pipe. It is discovered that easy-to-burn fuels can excite pulsation easily. By contrast, difficult-to-burn fuels are hard to excite pulsation owing to the delayed ignition of such fuels and it is necessary to lengthen the tail pipe in order to achieve a good pulsation. When the ratio of air feed area and combustion chamber cross-section area is reduced to a certain degree, the pulsation characteristics of such difficult-to-burn fuels (such as residual oils, etc.) will transit to those of 1/4 wave-length pipe. On the other hand, there is no change in pulsation characteristics for easy-to-burn fuels, such as diesel oils, etc. The tests indicate that valve-absent pulsation combustion technology makes it possible to realize clean and highly effective burning of such difficult-to-burn fuels as residual oils and asphalt, etc. This is of great significance for the utilization of difficult-to-burn fuels, such as residual oils, etc. **Key words:** pulsation combustion, residual oil, Rijke pipe

利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(II)——三维截面温度场的测量= **Measurement of Flame Temperature Distribution Using Array CCD (II) — Three-dimensional Cross-section Temperature Field Measurement** [刊, 汉] / WEI Chen-ye, YAN Jian-hua, SHANG Min-er, CEN Ke-fa (Thermal Power Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 161 ~ 165

A practical model is set up with the help of a simplified measurement/test system designed for measuring flame cross-section temperature distribution using array charge-coupled device. After the slight improvement of a genetic algorithm the latter is employed to solve the above model in order to reestablish the flame cross-section temperature distribution to be measured. Then, the numerical character of the genetic algorithm is analyzed and a test conducted on an oil/coal mixed