脉动燃烧器的设计与研究

程显辰
(北京航空航天大学 宇航学院)

摘 要 介绍了北京航空航天大学近年来在脉动燃烧研究中所获得的结果,从满足脉动燃烧的最主要法则——瑞利准则出发,探讨了燃烧器主要部件,包括燃烧室、尾管、喷注器及输送系统的主要参数的影响因素,提出了以速度相似的原则建立工程设计方法的途径.

关键词 节能; 燃烧器; 设计; 脉动燃烧
分类号 TK 16

脉动燃烧器是利用燃烧不稳定性,在一定声学条件控制下,工作在声脉动状态下的燃烧器. 在脉动燃烧器的燃烧室内及其排气流中存在的声脉动对决定能量生产系统效率有关的动量传递(混合)、传热及传质等过程有着强烈的强化作用. 因而使燃烧器具有不可比拟的优点. 它具有很高的燃烧强度及燃烧效率;优秀的传热特性和极高的热效率(95 %);它的烟气中污染物排放很低;具有自呼吸特性,不用鼓风也不需用烟囱排烟. 这样,便可以大幅度地节省燃料(约 30 %)和构材(一半以上),有利保护环境. 因此对脉动燃烧研究的兴趣越来越高. 国外已有不少基于脉动燃烧技术的热水、热风、蒸气等装置投入市场,并在干燥、焚化、煅烧等工业领域取得成功. 但在国内仍处于鲜为人知的初始起步阶段.

脉动燃烧是一门新兴的边缘学科,对脉动燃烧器工作的驱动机理认识尚不完善,至今在脉动燃烧器研制上还缺乏完整的理性化设计方法,还不得不基本上依赖于试验. 这就在很大程度上限制了该技术的发展速度. 近年来北京航空航天大学对脉动燃烧的驱动机理及理性化设计方法进行了研究及探讨. 与此同时,对利用脉动燃烧的加热装置进行了大力开发工作,成功地研制出数种从 10 kW 到 300 kW 的系列应用脉动燃烧装置. 本文将探讨在脉动燃烧研究及开发实践中涉及驱动机理的一些关键问题及有关燃烧器设计及系列化的方法.

1 脉动燃烧器的构造及特性

至今,应用型脉动燃烧器按其工作所基于的声学系统可划分为三大类:四分之一波型(也称施密特型)、亥尔姆霍茨型和瑞克型. 在中、小功率能源转换应用范围内,最适用的是亥尔姆霍茨型脉动燃烧器. 因此用于我们这项研究并开发的中小功率脉动燃烧装置是带机械阀的亥尔姆霍茨型脉动燃烧器. 如图 1 所示,燃烧器由一个具有一定容积的圆柱形燃烧室,一根或数根尾管,一个圆柱形去耦器组成. 在燃烧室头部装有空气和燃料的进口. 空气和燃料通过各自的膜片式单向阀,由在圆柱面上互成 90°垂直安装的进口喷嘴,径向进入燃烧室. 在头部端面装有点火火花塞. 在空气单向阀之前装设一支小风机,只在点火之前进行吹扫及提供初始空气用,点火之后自行关闭. 去耦器是用于隔断辅助部件的声耦合,保证燃烧器系统的声学条件. 为消除噪声,在空气进口及排气去耦器之后各装有一支消声器. 整个燃烧器装设在水箱内,浸没在被加热介质中.

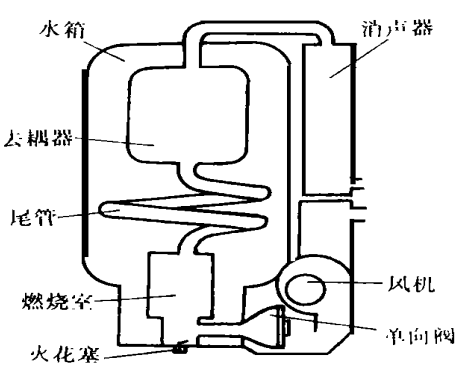


图 1 研究用的脉动燃烧器结构

空气和燃料最初进入燃烧室,混合成可燃混

收稿日期: 1996-08-29 作者 男 56 岁 教授 100083 北京

合物,被火花塞点燃.燃烧放热过程使燃烧室压力提高,关闭了单向阀.热的燃烧产物只能通过尾管向后膨胀排气.离开燃烧器的燃气惯性使燃烧室压力降低到低于上游介质压力,产生部分真空.这时单向阀重新打开,允许新的空气与燃料进入燃烧室(准确地说是"吸入"),与热燃气混合,加热,被点燃,释放能量,又造成新一循环的压力增高.就这样,周期性的燃烧过程就会自动重复进行,而不再需要火花塞.

所测得的亥尔姆霍茨型脉动燃烧器内压力驻波的分布如图 2 所示,尾管出口处振幅最小,近似为零,尾管进口处最大,燃烧室内各点压力大体相同,与尾管进口处最大振幅相同.速度脉动驻波的分布反之.对燃烧室控制容积 V_c,尾管长度 L_t 及截面积为 A_t 的一支亥尔姆霍茨型脉动燃烧器,在不考虑加热对频率的影响时,可粗略地用亥尔

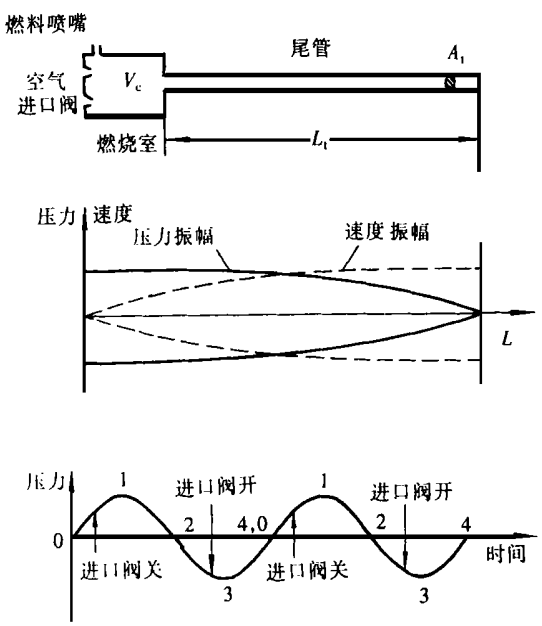


图 2 燃烧器声压波形及驻波分布

姆霍茨谐振器的基本公式估算其脉动频率:

$$f = \frac{\bar{c}}{2\pi}\sqrt{\frac{A_t}{V_c \cdot L_t}}$$

式中 $\bar{c}$ 为平均音速.

2 瑞利准则

脉动燃烧的实现是由燃烧过程的热释放自发地激发系统中介质的压力脉动,气体的压力脉动与燃烧过程的相互作用导致周期性的热释放率.为维持脉动,燃烧过程提供的能量必须能补偿上由粘性流动,热传递和声能辐射出系统等带来的能量损失.同时,为在燃烧器中驱动脉动,周期性的热释放必须与压力振荡同相位.这个必备条件被称为瑞利准则(Rayleigh's Criterion),是脉动燃烧的基本法则.

在上述工作过程中,新的可燃物是在压力振动接近最低压力时进入燃烧室的.为了满足瑞利准则,从它们进入燃烧室,混合,被加热,到反应放热过程的时间长短(称为特征燃烧时间),必须保证其大部分放热发生在接近压力最高的时刻,也就是说,混合及反应放热过程必须在大约半个周期内完成.即特征燃烧时间等于脉动周期的一半,$\tau_c = (1/2)\ T$.同时,燃烧放热必须发生在压力振幅最大的地方,即燃烧室内.燃烧器内声耦合的过程过分依赖于具体构造,以致使不同构造下燃烧器具有不同的驱动机理,给研究和设计带来很大困难.在具体的工程设计中通常不容易做到热释放过程与压力脉动之间的相位差正好为零.理论分析表明,只有在 ±90°之内,放热才能驱动压力的振荡.相位角的大小是衡量一个脉动燃烧器工作稳定性及脉动强烈与否的关键参数,也就是设计者应致力去满足的关键参数.

3 结构几何参数的选择及影响

根据亥尔姆霍茨型脉动燃烧器的原理,脉动周期 T 决定于燃烧器几何尺寸及燃烧器中温度的分布.而特征燃烧时间包括流动、混合和加热及化学反应所需时间.化学反应所需时间主要决定于燃料本身的特性,而且是有限的.当冷的反应物在压力循环周期中低压力时被喷注入燃烧室,并不会马上燃烧,要经过燃料和空气的混合到一定浓度,及冷的可燃物与热的燃烧产物的混合,加热到燃点才能发生反应.故物理过程所需时间起主导作用.此混合加热过程受到喷注系统的流体力学特性制约,主要受制于流速和湍流特性.因而严格控制各主要部位的流速,便可控制这些物理过程所需的时间.由此,可导出一个简单易行的工程设计方法.在相似的结构条件下,特别是在系列化设计中,利用流速相似的方法来确定关键部位,诸如空气和燃料输送管路,单向阀,喷嘴及尾管等的结构尺寸,以满足时间要求.使用这种方法,我们设计了十余种使用不同燃料、不同功率的脉动燃烧器.实践证明,所设计的燃烧器的工作性能参数,如实际功率、余气系数、声压水平、脉动频率等与设计参数高度吻合.性能参数都达到如下水平:声压脉动 170 dB,CO < 100 $\times 10^{-6}$(摩尔含量),

NO_x < 50 ×10^{-6} (摩尔含量),热效率达 94 %以上.

1) 燃烧室

燃烧室容积 V_c 取决于燃烧放热强度. 脉动燃烧器具有远高于稳态燃烧器的燃烧强度(可达 5.8 ×10^4 kW/m^3). 脉动燃烧器并不是常规概念中的燃烧器或烧嘴,它是一个燃烧及换热的完整的系统. 因此,不能只片面追求高的燃烧强度,还应考虑换热面积,声驱动质量及燃烧组织,根据其用途来确定. 在中小功率热水装置中一般可取 1 ～2 ×10^4 kW/m^3. 从原理上讲,长细比(L/D)并不影响其性能. 实践中我们发现,在保持一定容积下,细长形比短粗形好,便于把燃烧放热局限于燃烧室内,不使火焰进入尾管,以满足瑞利准则规定的燃烧放热发生在压力脉动幅度最大的地方这一条件,使脉动强烈并稳定.

2) 尾管

在燃烧室容积 V_c 一定时,压力脉动的周期是尾管长度 L_t 和截面积 A_t 的函数,因此可改变尾管的参数使 $\tau_c = (1/2)\ T$,以满足瑞利准则. 在实践中发现,尾管长度在一定功率下存在一个确保脉动工作的最短极限值 $L_{t\,min}$. 如在某较大功率燃烧器实验中,L_t = 2 800 mm,燃烧器稳定工作在 37 Hz,声压达到 169.6 dB. 按理论分析,若维持脉动频率不变,把燃烧室加长而加大其容积,尾管长度应可缩至 2 200 mm. 尽管在这种情况下 τ_c 没变,仍满足 $\tau_c = (1/2)\ T$,燃烧器却无法正常工作. 只有把尾管长增加到 2 800 mm 后,才建立起稳定的脉动工作状态,频率为 32 Hz,声压169 dB. 这是因为,为维持压力脉动,尾管中流动的燃烧产物必须保证有足够的惯性力的缘故. 或者说,尾管必须具有一定的阻抗. $L_{t\,min}$可以粗略地按下式确定:$L_{t\,min} = 18\,Q^{0.4}$,式中 Q 为投入功率.

尾管加长能增加换热面积,提高换热效率,但同时会增加在尾管中的流动损失,增高燃烧室内平衡压力,不利于自吸工作. 随尾管长度的增加,脉动频率会同声学理论所预计的那样不断降低. 从对压力脉动波形的 FFT 分析中可以发现,随 L_t 的加长,压力信号中的二次谐波分量逐渐增强,使脉动的稳定性下降. 当 L_t 增长至某临界值时,燃烧器脉动频率会从基波型振荡频率跃迁到二次谐波振荡频率值(图 3). 起初放热与基波型压力振荡同相位,当 L_t 增加时,脉动周期 T 随之加长,但特征燃烧时间 τ_c 并没有改变. 这使热释放过分领先压力脉动,使相位差加大,使满足瑞利准则的程度变坏. 当周期 T 加长到临界值之后,热释放便与二次谐波的压力脉动同相位,τ_c 等于二次谐波周期的一半,因而此时驱动起二次谐波压力脉动. 从这方面看,适宜的尾管长度应确保绝大部分声振动能量集中在基波振动频率上.

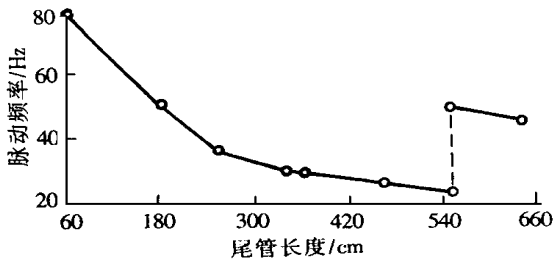


图 3　频率跃迁

保证尾管总截面积不变,增加尾管数目,使换热表面增加,以提高换热效率,同时因每根尾管截面积减少,在小功率条件下会使摩擦损失增加很多,从而抵消了换热面增加的效果,未必能取得实效. 另外,换热的增加使尾管内温度下降,将使脉动频率有所降低. 流动损失的增加又使燃烧室内平衡压力有所增高. 实践证明,当尾管数目增至一定数量之后,效率的增加便微乎其微,却大幅度增加了耗材量及成本.

3) 喷注系统及燃烧组织

空气和燃料的供应系统及喷注器的特性强烈地影响脉动燃烧器的工作,甚至起振与否. 因此,喷注器及进气道构形及尺寸,单向阀的位置等是设计者必须谨慎对待的.

由于加热装置总体结构的限制,单向阀往往不得不放在距喷嘴一定距离的地方. 两者之间的这一段进气道的尺寸 L_{in}常关系到设计的成败. 在研究这一影响的试验中发现,一个正常脉动工作的燃烧器,当 L_{in}增长到 385 mm 时竟不能起振. 当进一步增长到 600 mm 时,又恢复脉动工作状态,但由于阀吸气流量不足,只振到 150 dB,燃烧亦显出不完全性. 由带机械阀的脉动燃烧器驱动机理知,单向阀的开闭是由燃烧室中的压力脉动所驱动. 当室内压力处于负压力时,这个负压波按音速传到阀室,打开单向阀,所用时间为 t_w,此后,燃料或空气经过阀室及进气道流动、喷入燃烧室所需时间为 t_f,然后是混合加热时间 t_m 和化学反应时间 t_r,才释放能量. 这样特征燃烧时间 $\tau_c = t_w + t_f + t_m + t_r$,而 $t_w + t_f$ 是这一段进气道长度 L_{in}的函数. 设计不当就会导致 $\tau_c > (T/2)$,破

坏了瑞利准则所规定的相位关系. 当然,也可以使放热发生在下一个周期中压力最大的时刻,同样保证放热与压力同相位. 研究一下燃烧器内驻波分布(图 4)会发现,过长的 L_{in} 会使单向阀处在压力振幅已大幅度减小的位置,而吸气无力,达不到设计流量及所要求的混合比.

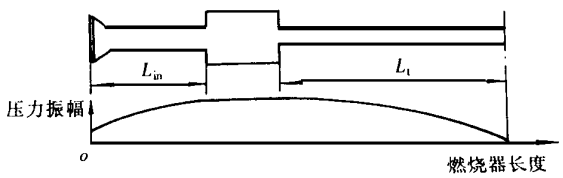


图 4 长进气道与驻波分布

脉动燃烧器中的声脉动大幅度强化混合及传热传质过程,在燃烧器设计中无需精细地进行燃烧组织工作,从而使其结构简单,容易制作. 前面所介绍的燃料射流从一个小孔喷出与空气射流成 90°互击的简单安排,得到了令人满意的结果,烟气中 CO 只有 50×10^{-6}(摩尔含量). 然而在使用比重较重的液化石油气的燃烧器研制中发现,在保持空气/燃料混合比不变条件下,随运行功率的增加,烟气中 CO 含量上升. 投入功率 25 kW 时 CO 含量为 40×10^{-6}(摩尔含量),50 kW 时为 $100 \sim 150 \times 10^{-6}$(摩尔含量),当功率升至 75 kW 时,CO 含量增至 $400 \sim 500 \times 10^{-6}$(摩尔含量). 但是,当燃烧器放在空气中干烧时,在所有情况下,烟气中 CO 含量只有 $10 \sim 18 \times 10^{-6}$(摩尔含量). 这里,动量传递、混合过程的改变起着重要的作用. 功率的增加是由扩大燃料喷孔直径实现的. 随喷孔的加大,燃料射流的动量很快增加,远大于空气射流的动量,导致不良混合过程,形成一些燃速较低的富燃的气体质团. 脉动燃烧器中强烈地向壁面传热使高温火焰区很短,在它们完全燃烧之前,已流动进入低温区,造成较多的 CO 的生成. 所以在投入功率提高时,应改善燃烧的组织,或改变燃料喷注器形状,把单孔变成多个小孔,以减小燃料射流的动量,以和空气射流相匹配;或采取准预混方式,把燃料喷注器置于空气进气道中,预先混合后再进入燃烧室.

4 结束语

瑞利准则是控制脉动燃烧器工作的基本法则. 为满足瑞利准则,必须保证特征燃烧时间等于压力脉动周期的一半,同时应保证燃烧放热发生在压力振幅最大的地方. 这是在脉动燃烧器主要部件,燃烧室、尾管和喷注器及输送系统结构设计中的基本出发点. 实践证明,利用流速相似的方法导出简便的工程设计办法,来确定关键部件的结构参数是成功的.

参 考 文 献

1 Zinn B T. Chapter II: Pulsating combustion. In: Weinberg F J, ed. Advanced Combustion Methods. London: Academic, 1986

2 Cheng X C, Daniel B R, Jagoda J I, Zinn B T. Dependence of pulse combustor performance upon interior temperature, acoustic losses and combustion time. In: Crameer T L, ed. Proceedings of 1989 International Gas Research Conference Tokyo Japan. Chicago, Illnois, USA: Gas Research Institute, 1989. 395～401

3 Zhinn B T. Pulsating combustion. Mechanical Engineering, August, 1985: 36～41

Design and Investigation of Pulse Combustors

Cheng Xianchen

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Astronautics)

Abstract It presents results obtained in an ongoing project at BUAA, stemming from the need to develop more ratinoal design methods. It discusses the effect of parameters of main elements of pulse combustors, including combustor chamber, tail pipe, injector and reactant supply system upon its performance, in the aspect of satisfying Rayleigh's criterion, the basical law of pulsating combustion. It was found that, a limit of minimum length of the tail pipe exists for a certain pulse combustor to keep an indispensable acoustic impedance. The characteristic and geometry of the reactant supply system and injector are very critical. It is proposed that an engineering design approach could be developed based on a velocity similarity concept. A series of pulse heaters rating 10 kW～300 kW were developed successfully using this concept.

Key words energy conservation; burners; design; pulse combustion