

狭长圆柱型燃烧室内的燃烧不稳定性

黎 军, 盛宏至, 魏小林, 田文栋, 吴东垠

(中国科学院力学研究所工程科学部 北京 100080)

摘 要 研究了狭长圆柱型燃烧室内的喷雾火焰燃烧的不稳定性. 为了更清楚地了解火焰的构造, 首先测量了火焰的温度场. 在较大的一次风和二次风变化范围内, 测量了压力的振荡特性, 得出其均方根值图. 结果表明, 火焰的稳定是由回流区完成的. 在较小的一次风燃料当量比和等量的二次风量时, 振荡强度达到 100 Pa 左右. 其频率为 200 ~ 230 Hz, 与空气/燃料比值关系不大. 分析还表明燃烧室中的振荡是轴向驻波振荡.

关键词 喷雾; 燃烧; 不稳定; 振荡

中图分类号: TQ038.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-8740(2003)02-0161-04

Characteristics of Combustion Instability in a Narrow Combustion Cylinder

LI Jun, SHENG Hong-zhi, WEI Xiao-lin, TIAN Wen-dong, WU Dong-yin

(Division of Engineering Sciences, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The characteristics of thermal instability in a confined combustion cylinder with liquid spray flame were investigated. The temperature distribution of the flame was obtained by thermocouple to get the flame structure. Root-mean-square (RMS) pressure oscillation contours within the relatively wide ranges of primary and secondary air flow rates were obtained. The results show that the spray flame is stabilized by the re-circulation zones. The maximum RMS pressure oscillation in this condition is about 100 Pa. The frequencies of instability are in the range of 200—230 Hz, which do not depend on the air/fuel ratio very much. This instability is believed to be an axial standing wave oscillation.

Keywords spray; combustion; instability; oscillation

在燃气轮机燃烧室、火箭发动机燃烧室、大型锅炉炉膛中, 都有燃烧振荡(燃烧压力振荡)的记录. 燃烧振荡与流动状态有密切关系, 在某些燃烧器中, 燃烧压力波动对反应物生成速率和放热速率影响显著. 如燃烧压力的波动增加放热速率, 也就进一步增加燃烧压力波动振幅, 形成燃烧振荡. Rayleigh^[1] 首先提出了判断燃烧振荡存在与否的标准, 简述为: 压力与放热率的相位相同时, 燃烧振荡被强化; 相位相反时, 燃烧振荡被抑制, 此判据简称为 Rayleigh Criterion(瑞利准则). Putman 等将瑞利准则表述为更确切的数学表达式. 目前常用瑞利指数 R (Rayleigh Index) 来判断燃烧

振荡发生与否, 当 $R > 0$, 将发生燃烧振荡并放大振荡; 当 $R < 0$, 燃烧振荡将被抑制.

发生燃烧振荡对燃烧室的运行和安全性产生极大的影响. 燃烧振荡会导致燃烧稳定性的下降, 严重时将直接导致熄火, 而熄火对于飞行器将导致灾难性的后果. 对于大型锅炉, 燃烧振荡引起的压力脉动可能导致燃烧室结构的破坏. 同时燃烧振荡还将导致燃烧状况的恶化, 表现之一是污染物排放的增加. 实际燃烧装置中积累的经验表明, 在高的容积热负荷下和 / 或贫燃料燃烧时, 燃烧振荡的问题尤为突出. 为了解决燃烧的振荡问题, 早期的方法是采用被动控制方法, 近年来

* 收稿日期 2001-06-27.

基金项目: 中国科学院创新重大项目(GKXC2-301), 国家重点基础研究发展项目(G1999022305), 教育部留学归国人员启动基金资助项目(教外司留[1999-747] 科学院留学归国人员启动基金资助项目).

作者简介: 黎 军 (1954—) 男, 博士, 副研究员. 联系人: 盛宏至, sheng@imech.ac.cn.

开始采用主动控制方法抑制燃烧振荡. 在某些情况下, 压力的振荡有可能促进燃料与空气的混合, 改善燃烧状况, 增加燃烧的稳定性^[2].

充分了解燃烧振荡的特点, 有助于抑制燃烧振荡, 或者激发燃烧振荡改进燃烧稳定性. 由于燃烧振荡的频率较高, 实验条件恶劣, 实时温度压力测量难度较大. 近年来, 随着快速响应的耐温、耐压传感器以及计算机技术的发展, 使得燃烧振荡的诊断和主动控制成为可能, 因而也成为国际燃烧领域的一个重要方向, 但目前国内在此领域的研究较少.

本文对一个接近燃气轮机实际燃烧室尺寸的旋流喷雾燃烧室内的振荡规律进行了研究, 得到了流动参数以及热负荷等对压力振荡的影响. 热负荷加大使振荡增强, 在一定的空气流量范围内振荡达到最大值, 增大和减小空气流量都将减弱振荡. 压力振荡的特征表明, 燃烧室腔体的纵向振荡形成压力振荡的基频. 此外还得到了在压力振荡条件下的火焰结构.

本文揭示了旋流喷雾燃烧室燃烧不稳定性的一些重要特征, 在化学反应条件下, 对于研究流动不稳定性、声学振荡与燃烧的相互影响等方面都有重要的参考意义, 是进一步开展燃烧振荡主动控制的基础.

1 实验装置

图 1 为实验系统的示意图. 一次风和二次风由空气压缩机和储气罐提供, 流量由孔板流量计和压差变送器测量, 信号由电压表读出, 再换算成流量. 燃料由燃料罐经高压氮气加压至约 1.0 MPa, 流量由转子流量计测量. 流量计经预先标定.

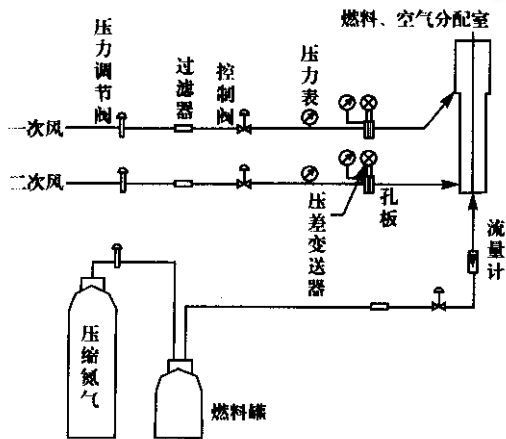


图 1 实验系统示意

图 2 为实验装置的示意图. 燃烧室为一圆柱型的空腔, 直径为 140 mm, 长度为 600 mm. 其一端为封闭端, 燃料和一次、二次风从此端送入; 另一端为开放的出口. 沿圆柱的轴向和周向布置若干测孔, 可测量不同位置的的压力和温度值. 图 2 同时表示了圆柱封闭端的燃料空气布置情况. 燃料喷嘴布置在封闭端的中心, 喷嘴外布置环型的二次风口, 在出口处安放有角度 45° 的轴向旋流叶片. 喷嘴为特殊设计的小流量喷嘴, 其雾化机理是压力雾化和气动内混雾化结合. 一次风用做辅助雾化空气, 压力为 0.1 ~ 0.2 MPa. 燃料压力约 1.0 MPa. 雾化锥角为 60°. 燃料喷雾也为旋流, 旋转方向与二次风相同. 以上的燃料和空气布置方式构成了旋流喷雾火焰. 燃烧室为从下向上布置, 燃料和空气由下部送入燃烧室, 燃烧产物从上部排出.

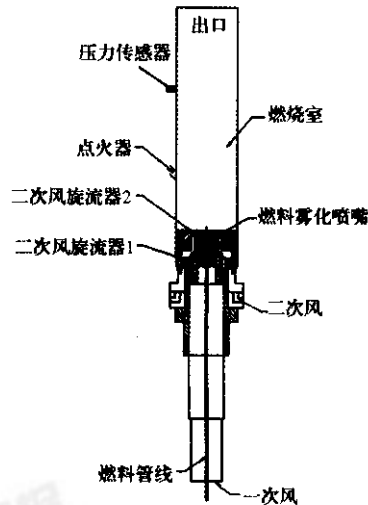


图 2 燃烧实验段示意

实验用燃料为工业酒精, 设定燃料流量为 1.76 和 2.03 g/s. 一次风流量范围为 0.11 ~ 4.5 g/s; 二次风流量范围为 13.5 ~ 22.5 g/s.

采用水冷型石英压电传感器测量压力, 响应时间为 10 μs, 信号经电荷电压转换放大器放大, 经计算机 A/D 转换采样并存储. A/D 板的精度为 16 bit, 采样频率为 10 kHz. 根据香农采样定律, 可分辨出 4.5 kHz 的信号. 压力传感器安装在圆柱形燃烧室的侧壁面上, 在燃烧室的中心附近(见图 2), 距离进口端 343 mm, 在火焰的上端, 是放热率较大的位置.

温度用普通双铂铑热电偶测量, 热电偶的结点裸露, 结点的直径约为 0.5 mm. 由于热电偶的响应时间较长, 所测量的温度为平均温度. 热电偶的测孔也沿燃烧室的侧壁面布置, 测孔的间距沿燃烧室的轴向为 25

mm,从燃烧室的下端到出口都布置了测孔.改变热电偶测孔的位置,并在测孔内伸缩热电偶,可测得燃烧室纵截面内的温度分布.在轴向距离大于400 mm以后,径向温度分布已经非常均匀,故不再测量温度分布.热电势由同一计算机A/D板记录,然后转换成温度值.

2 结果与分析

图3是燃料流量在1.76 g/s,一次风流量为2.2 g/s,二次风流量为15.8 g/s条件下测得的燃烧室内的温度分布,反映了火焰的基本结构.以上燃料和空气流量是根据压力脉动比较强的条件选取的.

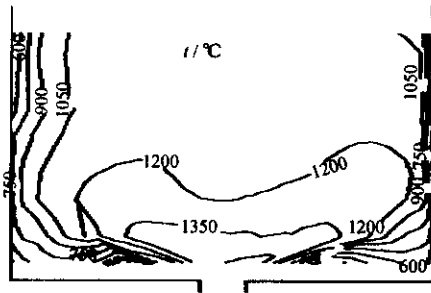


图3 燃烧室内温度分布

在燃料喷嘴的出口附近,燃料喷雾在以喷嘴中心为顶点的圆锥面附近分布.所用燃料(工业乙醇)的常压饱和温度为70°C左右,因此燃料所在的圆锥面的温度相对比较低.而在圆锥面内、外部的两个回流区内,火焰的温度已经达到了较高的水平.因此,整个燃料喷雾是从内、外两方面点燃的.随着向下游流动,温度在径向逐渐变得均匀.再向下游,与燃料雾相对应的外部区域的温度反而高于中心回流区的温度,这是燃料已经充分燃烧的结果.在此阶段,燃料燃烧的高温产物向回流区加热,而回流区将这部分热量带回到燃料喷嘴的进口处,从而对新鲜燃料和空气进行加热.从对温度场的分析可知,这是典型的旋流喷雾和回流区火焰稳定的燃烧室.

图4是燃料流量为1.76 g/s时的压力脉动的均方根值随一、二次风变化的分布图.图中的压力脉动值已经过无量纲化处理,特征的压力脉动值在此燃料流量下达到最大值72 Pa.从图可见,压力脉动(也就是燃烧振荡)发生在一定的空气量范围内,过高和过低的空气量都将导致压力脉动的减弱.但由于燃烧过程的要求,是不能仅仅依靠增大或减小空气量来控制燃烧振荡.采用分期送风的方案,在火焰根部采用过大和过

小的空气量,虽然可能避免燃烧振荡的产生,但可能增加了另外的燃烧不稳定因素,如回火、脱火等问题.

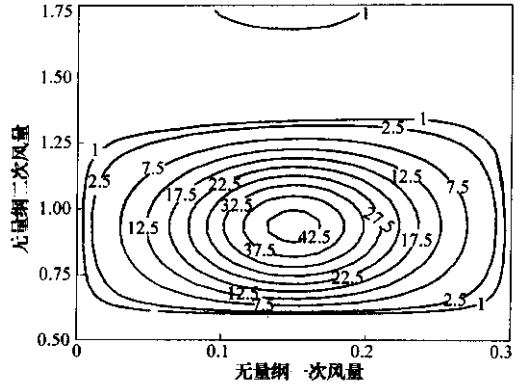


图4 压力脉动强度分布(燃料流量为1.76 g/s)

图5是燃料流量在2.03 g/s时的压力脉动分布图.其分布特性与图4中的结果相类似.其中特征压力脉动值是用在该种条件下的压力脉动最大值,该特征值与图4中的结果在同一量级上.对比图4和图5可知,实验有较好的重复性,而且在实验范围内燃料流量对压力脉动最大值的影响不是很显著.

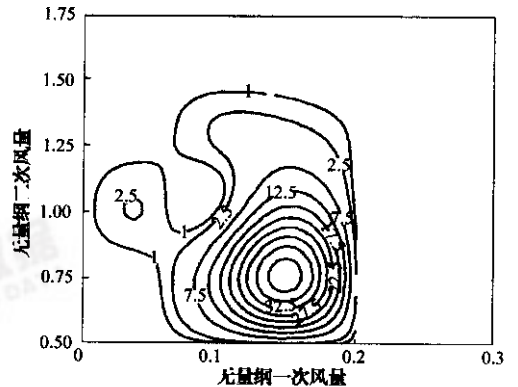


图5 压力脉动强度分布(燃料流量为2.03 g/s)

在实验中,对所获得的压力脉动值都进行了快速傅立叶变换(FFT).频谱分析结果表明,随着燃料流量和空气流量的变化,压力脉动的基频有所变化,但变化的范围有限.在实验范围内,基频在200~230 Hz范围内变化.图6是某个工况下的压力脉动的谱分析结果,其基频频率为210 Hz,同时,在二倍频420 Hz处,有一较小峰值存在.根据声学的基本概念,可以对燃烧室的振荡做进一步的分析.根据声速的定义,有

$$a = \sqrt{\gamma \frac{R}{\mu} T} \tag{1}$$

式中: T 为燃烧室温度,假设燃烧室内温度均匀,且等

于 1 000 K ; R 为通用气体常数 μ 为气体摩尔数(分子质量)这里用空气的 μ 作为近似 γ 为比热比,这里假设为 1.4.

可根据空腔轴向声学振荡频率的 1/4 波长公式计算频率,即

$$f_{1/4} = \frac{a}{4L} \tag{2}$$

式中 L 是燃烧室的轴向长度.

计算的 $f_{1/4}$ 为 265 Hz,略大于实验测量结果.以上计算所用的假设,燃烧室的出口比较小,而实际的燃烧室出口比较大,且存在质量流动.

多,因此实验得到的压力振荡不可能是燃烧激发的径向振荡.可以认为,实验测量的压力脉动频率是激发出的燃烧室轴向振荡频率.

在本实验中发现,燃烧振荡对于燃烧室的燃烧效率、火焰稳定性、设备和运行的安全性、污染物排放特性等均有非常不利的影响,应当加以控制,因而进一步研究对燃烧振荡的控制,特别是主动控制非常必要.

3 结 论

1) 在本实验装置的圆柱型燃烧室中,采用酒精作为燃料,在一定的流量范围内,可产生中等强度的燃烧振荡,压力的均方根值最大值在 75 Pa 左右;

2) 在实验范围内,空气流量对燃烧振荡的影响明显,在无量纲一次风量 0.15 和无量纲二次风量 0.9 附近,燃烧振荡达到最大值,燃料绝对数量的影响不太明显;

3) 燃烧室内的燃烧振荡频率的基频在 200 ~ 230 Hz 的范围,相应的轴向驻波的基频远低于径向驻波的基频,表明燃烧室内的振荡是轴向驻波振荡;

4) 可以检测到二次谐波,但幅值很小;

5) 进一步研究对燃烧振荡的控制,特别是主动控制很有必要.

参考文献:

[1] Rayleigh J W S. *Theory of Sound* [M]. New York :Dover ,1945.
 [2] Li J ,Acharya S. Flame stabilization though forcing :velocity measurement [A]. In :AIAA. 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C]. Reno ,Nevada :AIAA ,1998 ,98-0644 :1—12.
 [3] Bracco F V. Standing acoustic waves in a confined non-uniform gas [J]. *Journal of Sound and Vibration* ,1975 ,41(3) 301—309.
 [4] Ando Y. On the sound radiation from semi-infinite circular pipe of certain wall thickness [J]. *Acoustica* ,1969 ,22(1) :219—225.

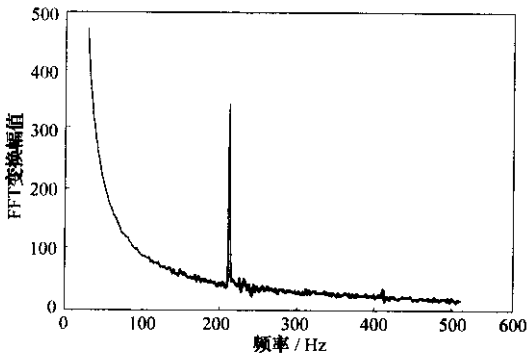


图 6 压力脉动频谱

Bracco 的研究表明,实际的轴向驻波的节点是在燃烧室出口的下游,这说明以上的计算会产生正的偏差^[3],使得计算得到的频率值偏高,因而实际的轴向频率应该比 265 Hz 要低. Ando 的研究表明,燃烧室温度的非均匀性会引起驻波频率计算值的变化,而且温度非均匀性可能会引起频率计算值降低^[4]. 根据以上近似计算和文献[3 4]的结果,实验测得的频率应该是在轴向驻波的频率范围内. 由于燃烧室空腔的径向尺度比轴向尺寸小得多,其固有声学频率要高得