

# 预混燃气射流火焰噪声与火焰稳定性

刘 勇 杨宏旻 马卫民 顾 瑾 徐益谦

(东南大学热能工程研究所, 江苏 南京 210096)

**摘 要** 本文通过视频信号与声频信号实验分析了燃气射流火焰的声发射特征。燃气火焰的声发射在出现上有其突发性, 与火焰的不稳定工况有关。当气流速度使火焰而达到临界脱火状态时, 声发射达到最大。初步分析表明, 当气流速度达到可以使未燃混合气突入火焰面内使火焰发生微小爆炸, 引致声发射在宏观上突然增加。本文分析对于通过声波监测火焰, 预警脱火有一定作用。

**关键词** 火焰稳定性; 火焰噪声; 声频分析; 视频分析

中图分类号: TK16

文献标识码: A

文章编号: 0253-231X(2000)05-0637-05

## 1 引 言

由带化学反应的 N-S 方程组可以推导出一般化学反应流场的压力波动方程<sup>[1]</sup>:

$$\nabla^2 p - \rho \kappa \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -f(\mathbf{r}, t) + \text{div} \mathbf{F}(\mathbf{r}, t) - \nabla \cdot (\mathbf{R} + \mathbf{V}) \cdot \nabla \quad (1)$$

其中  $\mathbf{R}$  为雷诺应力张量,  $\mathbf{V}$  为粘性应力张量, 其他符号详见文献 [1] 之 382 页。上式右端即为声源的产生式, 第一项为单极子声源, 它对应于化学反应或物理过程导致流体质量、体积变化而引起的声发射; 第二项为作用于流体上力的不均匀性导致的双极子声源; 第三项为应力作用产生的四极子声源。湍流流场和化学反应在燃烧声发射中起重要作用。

实验中的一个明显的事实是无论在什么情况(燃/气比, 气流速度等)的稳定燃烧工况下, 只要存在一定的扰动因素将火焰推动到临界稳定状态(火焰即将脱火的离焰状态)下, 声发射声压将达到最大, 对于这种状态下的声发射分析有助于降低燃烧系统噪声和监控火焰脱火的实践应用。

## 2 实 验

本文的信号采集是基于多媒体计算机的, 直接应用多媒体计算机提供的高质量的信息获取技术来进行视频和声频的同步采集和分析(图 1)。CCD 摄像机、录像机和图像采集压缩卡构成图像采集系统; 麦克风、录像机和声卡构成声波信号采集系统; 图像压缩卡将这两种信号同步压缩成 Windows AVI 格式并保存, 其中视频采用 25fps 的 PAL 制式,

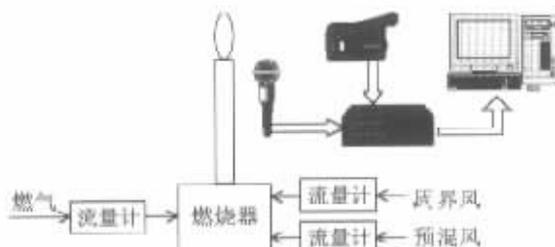


图 1 实验系统图

收稿日期: 2000-01-17; 修订日期: 2000-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.59995460); 国家重点基础研究基金资助项目 (No.G1999022206)

作者简介: 刘 勇 (1971-), 男, 江苏宿迁人, 博士研究生, 主要从事燃烧诊断研究。

声频采用 44.1 kHz 的 PCM 编码方式。

燃烧实验设备由燃烧器和流量计组成。燃烧器喷口内径为 2 mm; 引流段为双层同心圆筒, 其外层圆筒中通周界风, 内径为 24 mm; 内层圆筒通燃气或预混气, 内径为 4 mm; 下部为预混室。实验通过调节预混风流量来调节工况: 设定燃气流量为  $1.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , 分别调节预混风流量为  $Q = 1.11 \times 10^{-5}$ 、 $2.50 \times 10^{-5}$ 、 $2.78 \times 10^{-5}$ 、 $3.06 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ; 其中  $Q = 3.06 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  导致脱火。另外, 为了反映变化过程, 另设非稳定工况, 连续调节流量  $Q = 1.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} - 3.05 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

### 3 实验现象

在听觉上, 随着气流速度的增加, 在某一状态下, 声压突然增大, 声发射变的很明显, 这种变化与视觉的渐变不同, 仅仅当快接近脱火的状态下才会出现这种情况。图 2 显示了几种工况下的声波信号, 其中图 2(a) 的声波信号中没有刺状突起 (也可以称之为

时间间歇性), 图 2(d) 为图 2(c) 的相同状态但没有燃烧的情况下的声波信号, 可以看出它也没有时间间歇性, 而其燃烧工况 (图 2(c)) 有时间间歇性。另外, 用人的听觉直接判断的是图 2(a) 工况没有明显的声发射, 而其他的都有, 可以判断图 2(a) 工况的信号大部分为背景以及转换设备 (话筒、录像机、声卡) 的附加信号。这种时间间歇性的过程持续时间约为 0.02 s, 所以应用 25 fps 的图像采集设备是不可能观察到这个声发射细节的整个过程。

为了将声波信号与图像特征进行对比, 有必要对声波信号重新处理。本文应用 Wigner Distribution 理论<sup>[2]</sup>对声波信号进行分析, 即 WD 谱分析。图 3 为不同工况的 WD 能量谱  $P(t)$  分布变化图, 其中  $Q = 1.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  的声波  $P(t)$  曲线基本上为一曲线, 而  $Q = 2.50 \times 10^{-5}$ 、 $2.78 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  工况的变化较为复杂, 即反映了这些信号中的时间间歇性, 图中这两种工况的  $P(t)$  值域基本上差不多, 因为这两种工况很接近。图 4 为不稳定工况的  $P(t)$  图, 从中可以明显看出声波发射的转折点, 声波发射的时间间歇性是突然出现的, 从其相应的脱火高度  $d$  曲线可以看出, 这意味着脱火的不稳定工况将要发生。

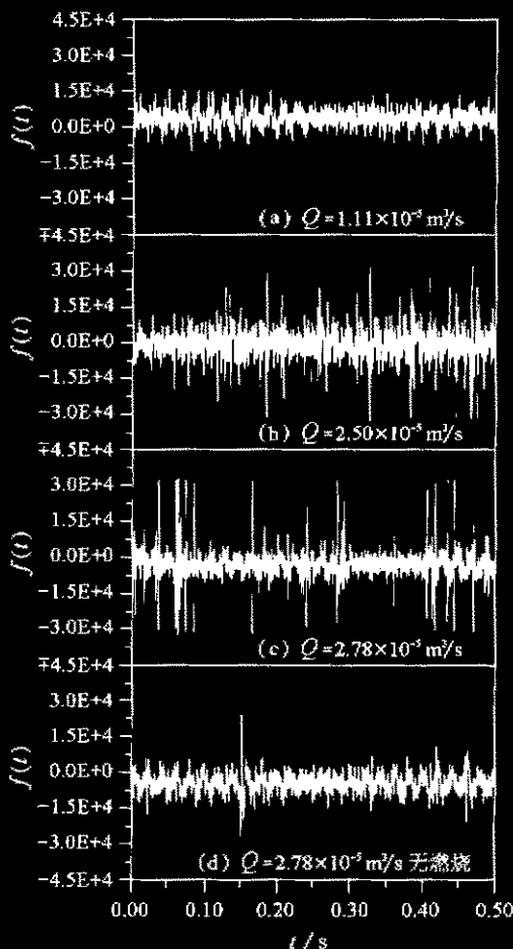
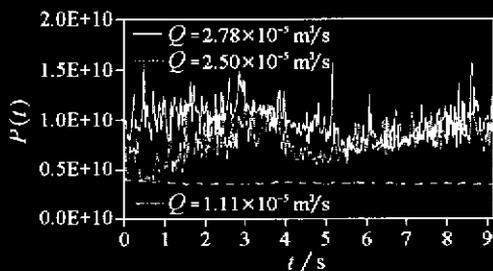
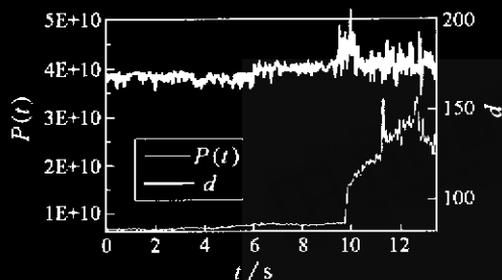


图 2 各种工况的声波信号

图3 不同工况的  $P(t)$  变化图4 非稳态工况的  $P(t)$  与  $d$ 

## 4 分 析

对于单极子声源, 声波方程的解可以化简为<sup>[3]</sup>:

$$p(r, t) = \frac{\rho_0}{4\pi r} \frac{\partial^2 V(t')}{\partial t'^2} \quad (2)$$

式中  $V$  为声源体积,  $t'$  为延迟时间。上式的求解过程中有一假设: 声源比波长小。式(2)表明, 声压正比于体积加速度。

对于未燃预混气体在燃烧产物内部的体积变化过程可以按照是否反应分为两个阶段: 1. 未反应阶段, 此时由于燃烧产物的加热作用使气体密度发生变化导致体积的变化; 2. 化学反应阶段, 由于四周燃烧产物的加热作用产生很高的反应速度, 在很短的时间内, 产生大量的燃烧产物, 大量的热量释放使这部分气体在短时间内温度与压力变化都很大, 导致体积的变化率也很大。在下面的分析过程中首先分析第二阶段的体积变化导致的声波辐射。

### 4.1 燃烧反应过程声波辐射分析

对于一般燃烧反应, 可以将反应方程写为<sup>[4]</sup>:  $A \xrightarrow{k} B$ , 其中  $A$  为未燃气体,  $B$  为燃烧产物,  $k$  为反应速度常数。未燃气体  $A$  被燃烧产物所包围, 随着燃烧过程的进行,  $A$  的直径在减小, 反应混合物与已燃气体的直径  $d_{AB}$ , 在初始时刻  $d_{AB} = d_A$ 。  $A$  的质量消耗速率为  $g_A$ ,  $B$  的质量产生速率为  $g_B$ , 则有:

$$\beta g_A = g_B = k_B \rho_{B,\infty} Y_{B,s} \quad (3)$$

其中  $\beta$  为系数,  $k_B$  为  $B$  的生成速度常数,  $\rho_B$  为  $B$  的密度,  $Y_B$  为  $B$  的质量浓度。燃烧产物一方面由式(3)产生, 另一方面通过扩散向外排放。设传质系数为  $h_B$ , 则:

$$g_B = h_B \rho_{B,\infty} (Y_{B,\infty} - Y_{B,s}) \quad (4)$$

根据燃烧过程和传质过程的质量守恒, 燃烧产物和反应物的混合体体积变化加速度为:

$$\frac{d^2 V_{AB}}{dt^2} = -\beta c \pi \frac{d(d_{AB})}{dt} - c \pi \frac{d(d_A)}{dt} = 2c^2 \pi \left( \beta \frac{\beta d_{AB} + d_A}{d_{AB}^2} - \frac{1}{d_A} \right) \quad (5)$$

由式(2)可得未燃气体在燃烧过程中的辐射声压:

$$p_{AB}(r, t) = \frac{\rho_0}{4\pi r} 2c^2 \pi \left( \beta \frac{\beta d_{AB} + d_A}{d_{AB}^2} - \frac{1}{d_A} \right) \quad (6)$$

式 (6) 表明在燃烧过程中, 随着燃烧产物的生成,  $d_{AB}$  的增大和  $d_A$  的减小, 声压幅度在减小, 随着时间的变化, 声压逐渐减小。在燃烧反应开始的瞬间  $d_{AB} = d_A$ , 声压幅度为最大。式 6 表明, 当  $d_A$  减小到 0 时声压将达到负无穷大。在实践中由于反应混合物的混合比不可能正好为化学当量比且混合均匀以致混合物 (燃料 + 空气) 反应完, 当然空气中总是有大量的不参与反应的气体, 即  $d_A$  的减小有一个下限。

#### 4.2 未燃气体被燃烧产物加热过程的声发射分析

未燃烧气体在燃烧产物内被周围燃烧产物加热, 设初始温度为  $T_0$ , 密度为  $\rho_{A,0}$ , 半径为  $r_0$ , 压力为  $P$  且在膨胀过程中保持不变, 质量为  $m$ , 定容比热  $C_v$ 。在膨胀过程中保持不变。根据能量平衡有:

$$U + E_p + E_k = U_0 + E_{p0} + E_{k0} + Q \quad (7)$$

式中  $U$  为内能,  $E_p$  为势能,  $E_k$  为动能,  $Q$  为传热量。其中内能变化可以表示为:  $\Delta U = U - U_0 = C_v(T - T_0)m$ , 势能:  $E_p = PV(t) = \pi r_A^3 P/3$ , 动能<sup>[5]</sup>:  $E_k = 2\pi\rho_{A,0}r_A^2\dot{r}_A^3$ , 热量:  $Q = \int_{T_0}^T \alpha F(t_\infty - t)dt = \alpha F(T - T_0)$ , 其中  $\alpha$  为对流换热系数且在加热过程中保持不变,  $F$  为外表面积,  $F = 4\pi r_A^2$ ,  $r_A$  为半径, 记号  $\dot{x} = dx/dt$ , 所以:

$$\dot{r}_A^2 = \frac{2}{3} \frac{P}{\rho_{A,0}} \left( \frac{r_0^3}{r_A^3} - 1 \right) + \frac{(\alpha F - mC_v)(T - T_0)}{2\pi\rho_{A,0}r_A^3} \quad (8)$$

将气体状态方程  $nRT = PV$  对  $t$  求导可得:

$$\dot{T}/\dot{r}_A = 4\pi r_A^2 P / (nR) \quad (9)$$

其中  $n$  为摩尔数,  $R$  为气体常数。将式 (8) 对  $t$  求导并代入式 (9) 可得:

$$\ddot{r}_A = \frac{-P}{\rho_{A,0}} \frac{r_0^3}{r_A^4} + \frac{\alpha F - C_v m}{2\pi\rho_{A,0}} \left[ \frac{2\pi P}{nRr_A} - \frac{3(T - T_0)}{2r_A^4} \right] + \frac{4(T - T_0)}{\rho_{A,0}r_A^2} \quad (10)$$

由式 (8) 和式 (10) 可得体积变化加速度为:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V_A}{dt^2} &= 4\pi(2r_A\dot{r}_A^2 + r_A^2\ddot{r}_A) = 4\pi \left\{ \frac{4r_A P}{3\rho_{A,0}} \left( \frac{1}{4} \frac{r_0^3}{r_A^3} - 1 \right) + \frac{4(T - T_0)\alpha}{\rho_{A,0}} \right. \\ &\quad \left. + \frac{6\alpha r_A^2 - 2r_0^3\rho_{A,0}C_v}{3r_A^2\rho_{A,0}} \left[ \frac{T - T_0}{2} + \frac{3\mu r_A^3 P}{2\rho_{A,0}Rr_0^3} \right] \right\} \quad (11) \end{aligned}$$

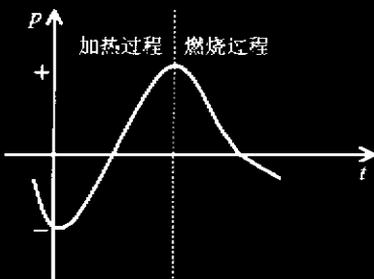


图 5 过程声压理论曲线示

式中  $\mu$  为气体分子量。由式 (2) 和式 (11) 即可计算未燃气体在加热过程中的声发射声压。

未燃气体的加热过程并不是无限的, 当气体温度达到着火温度  $T_f$  即开始第二阶段的过程, 即:

$$p(r, t) = \begin{cases} p_A(r, t) & T \leq T_f \\ p_{AB}(r, t) & T \geq T_f \end{cases} \quad (12)$$

根据连续性, 当  $T = T_f$  时, 应有  $p_A = p_B$ 。  $p_A$  的曲线比较复杂, 当  $T = T_0$  时, 即初始时刻  $t = 0$ ,  $p_A$

有可能为负值(取决于换热系数 $\alpha$ ),随着半径 $r_A$ 和 $T$ 的变大, $p_A$ 在一定条件之后上升。因此,总的声压曲线可以表示如图5所示。

## 5 结 论

实验室预混射流火焰燃烧噪声在火焰将要脱火的临界状态下达到最大,此时局部火焰燃烧速度为最大。该火焰燃烧噪声的产生机理不同于其他稳定状态,初步分析表明,未燃气体突入火焰内部产生微小爆炸,导致了宏观的声发射的突然增大。

本文试图从理论上分析燃气射流预混火焰实验中所产生的声发射特性,即在临界脱火状态辐射声压突然增大的机理。将过程分为两个部分:燃烧反应前的预混气加热过程和燃烧反应过程。分别对这两个部分所产生的体积变化加速度进行分析,得出了声压的理论形式。

## 参 考 文 献

- [1] P M 莫尔斯等. 理论声学. 北京: 科学出版社, 1984
- [2] 郑治真, 张少芬. 瞬态谱估计理论及其应用. 北京: 地震出版社, 1993
- [3] D 罗斯. 水下噪声原理. 北京: 海洋出版社, 1983
- [4] 傅维德等. 燃烧学. 北京: 高等教育出版社, 1989
- [5] Rayleigh Lord. On the Pressure Developed in a Liquid during the Collapse of a Spherical Cavity. *Phil. Mag.*, 1917, 34: 94-98

# RELATIONSHIP BETWEEN THE SOUND EMISSION OF THE PREMIXED GAS JET FLAME AND FLAME STABILITY

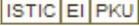
LIU Yong YANG Hongming MA Weimin GU Fan XU Yiqian

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract** Through the experimental analysis on the synchronous signal of audio and video of the premixed gas jet flame, the characteristic of the flame is studied. The sound emission of the flame appears a kind of outburst related to the stability of the flame. The sound pressure increased remarkably while the flame approach to the blow-off state. Analysis shows that the mixed gas intrudes into the hot production gas and the explosion inside increases the sound pressure of the emission. It is useful to the presentiment of the blow-off by acoustic detection.

**Key words** flame stability; sound emission; audio analysis; video analysis

# 预混燃气射流火焰噪声与火焰稳定性

作者: [刘勇](#), [杨宏旻](#), [马卫民](#), [顾璠](#), [徐益谦](#), [LIU Yong](#), [Yang Hongming](#),  
[MA Weimin](#), [GU Fan](#), [XU Yiqian](#)  
作者单位: [东南大学热能工程研究所, 江苏 南京 210096](#)  
刊名: [工程热物理学报](#)   
英文刊名: [JOURNAL OF ENGINEERING THERMOPHYSICS](#)  
年, 卷(期): 2000, 21(5)  
引用次数: 0次

## 参考文献(5条)

1. [PM 莫尔斯 理论声学](#) 1984
2. [郑治真. 张少芬 瞬态谱估计理论及其应用](#) 1993
3. [罗斯 水下噪声原理](#) 1983
4. [傅维镛 燃烧学](#) 1989
5. [Lord On the Pressure Developed in a Liquid during the Collapse of a Spherical Cavity](#) 1917

## 相似文献(2条)

1. 会议论文 [刘勇. 顾璠. 杨宏旻. 马卫民. 徐益谦 预混燃气射流火焰噪声与火焰稳定性](#) 1999

该文通过视频信号与声频信号实验分析了燃气射流火焰的声发射特征。燃气火焰的声发射在出现上有其突发性, 与火焰的不稳定工况有关。当气流速度使火焰面达到临界脱火状态时, 声发射达到最大。初步分析表明, 当气流速度达到可以使未燃混合气突入火焰面而使火焰发生微小爆炸, 引致声发射在宏观上突然增加。本文分析对于通过声波监测火争, 预警脱火有一定作用。

2. 期刊论文 [代松涛. 颜世森. 梁钦锋. 周志杰. DAI Song-tao. YAN Shi-sen. LIANG Qin-feng.](#)

[ZHOU Zhi-jie 撞击流对火焰稳定性影响的试验研究 - 洁净煤技术](#) 2008, 14(4)

研究了射流火焰噪声和撞击式火焰噪声, 对比两者以探求撞击流对火焰稳定性的影响。对火焰噪声信号进行频谱分析(FFT), 结果表明, 射流火焰噪声包含燃烧噪声和喷流噪声, 火焰噪声以燃烧噪声为主, 撞击式火焰噪声是主频约420Hz的高频噪声, 由燃烧噪声、喷流噪声和撞击区燃烧噪声组成。撞击式火焰噪声频谱图表明, 撞击流强化了气化燃烧, 有利于火焰的稳定, 对气化炉的稳定运行有重大意义。

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gcrwlbx200005028.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gcrwlbx200005028.aspx)

下载时间: 2010年5月27日