

DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2015.11.023

声场频率与振幅对火焰 NO_x 生成特性的影响

沈忠良, 邓 凯, 王明晓, 钟英杰

(浙江工业大学 能源与动力工程研究所 脉动技术工程研究中心, 浙江 杭州 310014)

摘要: 针对频率为 0~180 Hz 和压力振幅为(0~1 000) Pa 的声场作用对甲烷/空气部分预混火焰 NO_x 生成特性的影响, 通过高速摄像、火焰直拍、热电偶测温等技术, 分析火焰 EINO_x 、火焰长度与声场振幅、频率之间的关系。结果显示, 在频率为 0~180 Hz 和压力振幅为(1~1 000) Pa 内, 当频率 f 一定时, 随压力振幅的增加, 火焰与周围气体的掺混进一步增强, 火焰长度减小, 高温区域停留时间减小, 致使 EINO_x 生成降低, 且 EINO_x 与振幅之间存在线性关系, 斜率为 -0.009~-0.003。在振幅一定时, 随频率的增加, 声对火焰的影响逐渐减弱, 火焰长度逐渐增加, 火焰区域的平均温度降低, 导致 EINO_x 增加, 且 EINO_x 与频率之间存在线性关系, 斜率为 0.01~0.03。

关键词: 声场; 部分预混火焰; NO_x 生成因子; 频率; 振幅

中图分类号: TK 16

文献标志码: A

文章编号: 1008-973X(2015)11-2198-07

Effects of acoustic frequency and amplitude on NO_x of partially premixed flame

SHEN Zhong-liang, DENG Kai, WANG Ming-xiao, ZHONG Ying-jie

(Engineering Research Center of Pluse Technology, Institute of Energy and Power Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The effects of acoustic frequency(0~180 Hz) and amplitude(0~1 000 Pa) on the NO_x of methane/air partially premixed flame were investigated experimentally. High speed camera, flame image and thermocouple temperature measurements were used to analyze the relationship between acoustic amplitude and frequency with EINO_x . The results show that when acoustic amplitude increases, EINO_x decreases. The reason is that under the larger acoustic amplitude, the strengthen of mixing of flame and surrounding gas lead to the decrease of flame length and global residence time, which is the major factor for the lower EINO_x . There is a linear relationship between EINO_x and amplitude that the slope of the linear function is range from -0.009 to -0.003. The results also show that when acoustic frequency increases, EINO_x increases. Because that under the higher frequency, the effect of acoustic field on flame decreases, then lead to the longer flame length, which is the reason for higher EINO_x . There is a linear relationship between EINO_x and frequency that the slope of the linear function is range from 0.01 to 0.03.

Key words: acoustic; partially premixed flame; NO_x emission index; frequency; amplitude

声作用下的燃烧过程 NO_x 生成与火焰参数、流场参数、声参数之间存在着重要的关系, 是污染物生成机理及污染物控制等方面的重要内容^[1]。国内外学者对声作用下火焰 NO_x 生成的特性进行研

究^[2-8], 并提出了一些有重要意义的结论和观点。

Chao 等^[9]通过 LDV、OH-PLIF、火焰图像直拍等技术对声场频率 0~110 Hz、声场振幅 0、80 dB 作用下的氢气层流扩散火焰 NO_x 生成特性和火焰

收稿日期: 2014-10-17.

浙江大学学报(工学版)网址: www.journals.zju.edu.cn/eng

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106139).

作者简介: 沈忠良(1987-), 男, 博士生, 从事低污染燃烧技术、燃烧模型等方面研究. ORCID:0000-0002-5486-7991. E-mail:mdzx@zjut.edu.cn

通信作者: 邓凯, 女, 讲师. ORCID:0000-0003-0233-3442. E-mail:dkai@zjut.edu.cn

长度、射流速度、伴流空气流速(coaxial flow)等之间的关系进行研究. 结果获得了声作用下伴流空气流速、流体 Re 数、 Da 数、全局应变率、频率等参数与 NO_x 生成之间的关系. Zilwa 等^[3]获得了由于燃烧振荡而引起的当量比(空气系数)变化对燃烧过程 NO_x 生成所产生的影响规律. Tashtoush 等^[10]发现声作用有效地降低了预混火焰 NO_x 生成(降低至 61.5%),且这样的降低效果依赖于声场频率和声的影响形式. Hassan 等^[11]关注了声场频率对不同氨含量预混火焰 NO_x 生成的影响,结果发现,随着氨含量的增加,部分预混火焰 NO_x 生成变化不大,都符合周期性变化的规律,认为复燃(Reburn)等情况的发生是导致 NO_x 变化的主要原因. Bagheri 等^[12]研究了 135 至 555 Hz 贫燃预混火焰,给出了不同频率下火焰形态的变化,使得声场频率变化对火焰 NO_x 影响的研究可以在火焰形态上获得解释. Jeongseog 等^[13]给出了声作用下的扩散火焰 NO_x 生成随声场频率(150~1 000 Hz)的变化关系,指出随着声场频率的变大火焰 NO_x 生成有所增加,但增加程度有限.

上述研究都致力于对特定声环境下火焰 NO_x 生成与火焰参数、流场参数之间关系的研究,并没有给出火焰 NO_x 生成与声参数之间的确切关系. 近年来,国内外学者给出了频率与预混火焰、频率与扩散火焰 NO_x 生成之间的关系^[14],而对声作用下的部分预混火焰 NO_x 生成的研究较少,特别是声场频率、振幅与部分预混火焰 NO_x 生成之间的定量关系. 因此,现有研究不能具体、全面给出声参数对于火焰 NO_x 生成的影响及其作用机制.

本文实验研究了频率为 0~180 Hz、振幅为 0~1 000 Pa 的声场对部分预混火焰 NO_x 生成的影响,给出了声场频率与火焰 NO_x 生成之间的关系,并分析了频率与燃烧过程中 EINO_x 存在的特定规律;探讨了声场振幅对火焰 NO_x 生成的影响,并对振幅变化引起的火焰 NO_x 生成变化进行了解释,同时从火焰形态的角度分析了原因.

1 实验系统

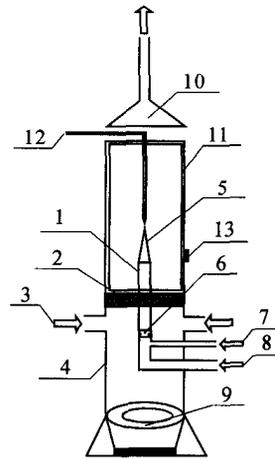
1.1 实验装置

本文搭建声作用下火焰 NO_x 与动力学测试系统,该实验系统采用扬声器激励产生声的方法,为火焰创造频率 f 、振幅 A 可调的声环境.

实验系统如图 1 所示,实验管段直径 150 mm,全长 1 600 mm,管内布置本生型燃烧器,燃烧器管径为 18 mm,燃料与一次空气由燃烧器内进入燃烧

区域,二次风(coaxial air)通过外管区域进入,二次风入口设置于实验管段下部. 实验系统采用上端开口、下端封闭的设计,扬声器布置于系统底部,可产生稳定可调的声环境. 本实验燃料为甲烷,通过质量流量控制器控制燃料、一次风和二次风的流量. 为了保证燃料与一次风充分均匀混合,实验装置在燃烧器中加入了多孔材料,增强混合效果,在二次风通道中也设置了金属多孔介质材料.

实验采用固维 AFG-2225 信号发生器、6.5 英寸 JBL-A0208A 型扬声器搭配 Accuphase PRO-3 型功率放大器,管内声参数范围为频率 0~180 Hz、振幅 0~1 000 Pa. 压阻传感器采样压力信号,压力传感器的测压位置设置于火焰根部以上(如图 1 所示),实验过程中对压力信号采用实时监测,采用 S 型细丝双热电偶测温,数据采集采用 NI-DAQ 数据采集仪. NO_x 数据采用瑞士 ECO Physics CLD60 电化学 NO_x 分析仪,烟气数据采用奥地利 MADUR PHOTON 红外烟气分析仪;烟气采集装置参考了 Costa, M 团队^[15]的工作,并进行了适应性改造,数据采集过程均通过三维电动坐标架进行定位,定位精度为 0.1 mm;实验中,火焰图像采用 Microview MVC1000DAF-GE1000 高速相机和 Canon EOS 550D 进行记录,高速摄像采样频率 100 Hz.



1-燃烧器;2-多孔介质;3-二次风进口;4-管体;5-火焰;6-多孔材料;7-燃料进口;8-一次风进口;9-扬声器;10-烟气采集装置;11-视窗;12-细丝热电偶;13-压力传感器

图 1 声场作用下火焰特性实验系统

Fig. 1 Experimental system of flame under acoustic excitation

1.2 误差分析

本实验主要考虑系统误差中的测量误差和传递误差,测量误差考虑测量仪器的精度误差. 如表 1 所示给出了组分浓度分析仪的测量精度,其中 rel 表示实际测量的数据.

表1 组分浓度分析仪的测量精度

Tab.1 Measurement precision of component concentration analyzer

组分名称	测量仪器	测量范围	测量精度
O ₂		0~25%	±0.1%或2%rel
CO ₂	奥地利 MADUR PHOTON 红外烟气分析仪	最小 0~5%	±0.03%或2%rel
CO		0~2×10 ⁻⁶	±3×10 ⁻⁶ 或2%rel
CH ₄		最大 0~10%	±0.3%或2%rel
NO	瑞士 ECO Physics CLD 60 NO _x 分析仪	0~0.5×10 ⁻⁷ 至 0~10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁹
NO ₂		0~0.5×10 ⁻⁷ 至 0~10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁹

本文采用 NO_x 生成因子(EINO_x)以计量 NO_x 生成情况,EINO_x 被定义为每单位质量燃料所产生的 NO_x 生成量,单位 g/kg.若燃料中所有的碳均转化为 CO₂ 和 CO,其定义其定义式为

$$EINO_x = \left(\frac{x_{NO_x}}{x_{CO} + x_{CO_2}} \right) \left(\frac{mMW_{NO_x}}{MW_F} \right)$$

式中: x_i 为摩尔分数, m 为燃料中碳原子的物质质量, MW_i 为摩尔质量.

根据误差传递公式,EINO_x 的算术平均误差为

$$\Delta EINO_x = \left(\frac{\Delta x_{NO_x}}{x_{CO} + x_{CO_2}} + \left(- \frac{\Delta x_{CO} \cdot x_{NO_x}}{(x_{CO} + x_{CO_2})^2} \right) + \left(- \frac{\Delta x_{CO_2} \cdot x_{NO_x}}{(x_{CO} + x_{CO_2})^2} \right) \right) \left(\frac{xMW_{NO_x}}{MW_F} \right)$$

由实验数据计算所获得的 EINO_x 的误差为 0.001~0.005 g/kg,小于实验所测得该物理量的 1%,认为实验数据是准确的.

1.3 实验系统声学特性

本实验系统采用扬声器底部设置的形式,目的是为了获得较为稳定的正弦波信号,且实现振幅与频率的可调节.

如图2所示给出了 $f=150$ Hz、 $p_A=570$ Pa 声环境下的压力信号测试值,图中显示试验系统能获得较为稳定的正弦波信号,且该正弦波信号无明显信号噪声,可以验证该声环境发生装置的可靠性.

如图3所示给出了在不同火焰下的声特性曲线.由图可知,1)实验系统采用一端开口一端封闭形式的驻波管,存在一定的固有振动频率,当扬声器产生的声场频率与该固有频率一致时,管内气流产生共振,形成压力幅值较大的工况点.该扬声器产生声场与该实验装置的共振点分布在 155 和 260 Hz 左右.2)由于火焰的存在,使得扬声器产生的声场振幅略有变化;使得装置与声的共振频率点略有后移.3)在不同一次空气系数 α 的火焰下,声场参数基本不变,且在实验过程中同步测量 NO_x 排放与声场参数,因此,火焰对声场特性的影响可以忽略.

1.4 火焰长度验证

火焰长度是燃烧研究中的重要参数,其测量方

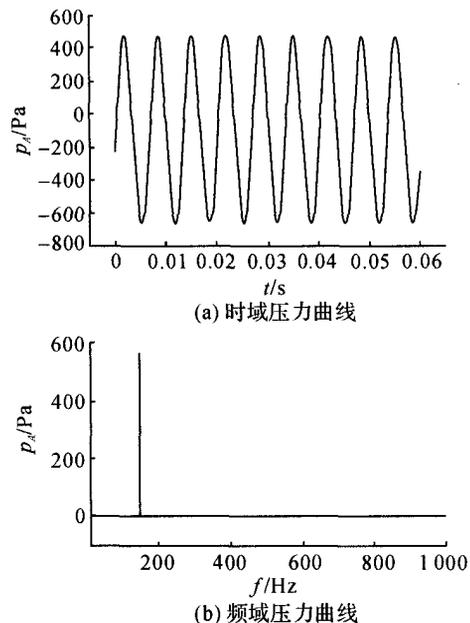


图2 压力信号数据

Fig.2 Pressure signal

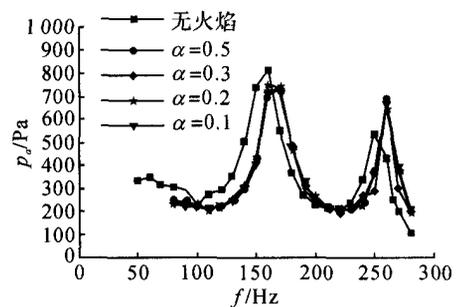


图3 不同火焰下的声特性

Fig.3 Acoustic characteristics of different flames

法主要包括火焰直拍图像处理、火焰红外图像测量、火焰区域热电偶测定、OH-PLIF 等 4 种方法^[16-19]. 本文结合直拍图像处理和火焰高温区域热电偶测定 2 种方法来获取火焰长度,直拍图像采用高速摄像记录,通过选定阈值可获取火焰轮廓线与火焰长度,本实验中直拍图像的一次采样数量为 200 张,在所处理的火焰长度数值中,剔除有明显突变数据的基础上,对数据进行平均,以选取较为准确的数值.

本文通过细丝热电偶测温的方式,进一步确定火焰区域所在位置,通过架设热电偶的三维坐标台架的准确定位,获取火焰长度值,选取温度 650 K 为火焰高温区域^[20-21]所在位置以验证直拍图像处理所获取火焰长度的准确性.为此,设计了用于火焰高温区域探测的细丝热电偶专用水冷套管,如图 4 所示,以保护补偿导线等附加电路.管内设置 0.3 μm 的 S 型细丝热电偶,衔接 0.2 mm 补偿导线,辅以不锈钢屏蔽外套,保证热电偶测量数据的可信.

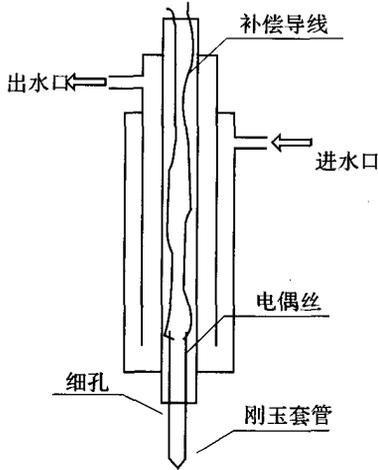


图 4 热电偶水冷套管

Fig. 4 Thermocouple water-cooling tube

如图 5 给出了甲烷体积流量为 1 500 nml/min,不同一次空气系数 α 的部分预混火焰直拍图像处理

与热电偶扫描测温所获得的火焰长度 L_f 的对比值.由图可知,在 4 种不同工况下,测温所获得的火焰长度与图像处理所获得的火焰长度误差在 3 % 以内,由此认为本文所获得的火焰长度数值是准确的.

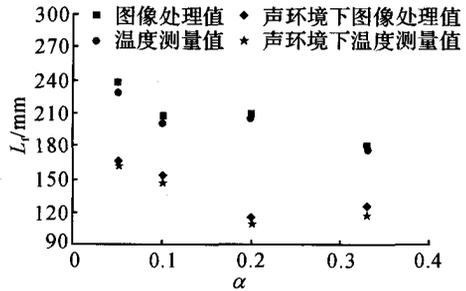


图 5 图像与热电偶扫描测温获得火焰长度对比图

Fig. 5 Flame length contrast figure based on temperature and flame image

1.5 实验工况

本文主要关注声作用下部分预混火焰的 NO_x 生成特性,考虑到实验过程中火焰的稳定性,选取一次空气系数为 0.5 和 0.33、甲烷体积流量为 1 000 和 1 500 ml/min 的部分预混火焰进行研究.

如表 2 所示给出了本文的实验工况,研究的声场频率 f 为 0 至 180 Hz,声场振幅 p_A 为 0 至 1 000 Pa.在实验过程中,气体流量通过北京圣业 SY-93 质量流量计进行精确控制,精度为实验所取流量的 0.1%.同时,实验过程中 NO_x 测量数据进行平均处理的时间周期为 2 s.

表 2 实验工况表

Tab. 2 Experiment conditions

工况	q _{v ch4} / (nml · min ⁻¹)	q _{v air} / (nml · min ⁻¹)	α	q _{v coaxial air} / (nml · min ⁻¹)	f/Hz	p _A /Pa
工况 1	1 000	5 000	0.5	10 000	0~180	0~1 000
工况 2	1 500	7 500	0.5	10 000	0~180	0~1 000
工况 3	1 500	5 000	0.333	10 000	0~180	0~1 000

2 结果与讨论

本文对声作用下的甲烷/空气部分预混火焰进行研究,分析了 0~180 Hz、0~1 000 Pa 的声作用对火焰 NO_x 生成特性的影响,进一步探讨声场振幅、频率与火焰 NO_x 生成之间的关系.

2.1 声场振幅对火焰 EINO_x 的影响

如图 6 所示给出了火焰 EINO_x 与频率、振幅之间的关系,1)在 0~180 Hz、0~1 000 Pa 的声作用下,火焰 NO_x 生成量明显小于稳态火焰(即频率 f=0 Hz)时的生成量.其原因在于,声作用使得火焰周边空气与火焰区域的传热传质加快,促使空气进入

火焰,一方面强化了燃料与气体的掺混,提高了燃烧速率的同时降低了火焰温度,另一方面使得火焰高温区域减小,在反应过程中的燃气在高温区域停留时间减小,从时间角度降低了 NO_x 的生成.

2)在 f=0~180 Hz 内,火焰 EINO_x 在不同频率的声影响下,随着振幅的变化规律是一致的.在频率不变时,随着声场振幅的增加,火焰 EINO_x 生成降低,振幅每增加 100 Pa, EINO_x 减小幅度为 15%~30%.不同频率声作用于火焰, EINO_x 与声场振幅之间存在线性关系,且满足

$$EINO_x \propto kp_A + b, k \in [-0.009, -0.003], b \in [1, 5].$$

式中: ∝ 表征正比关系, k、b 为常数.

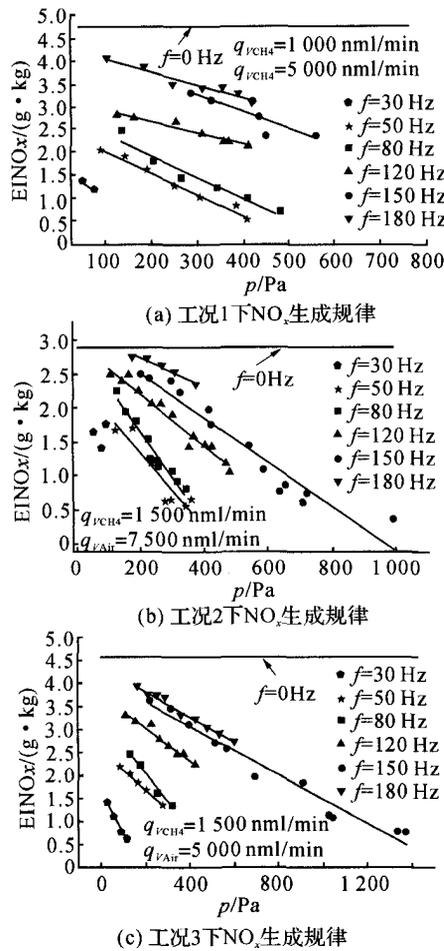


图6 部分预混火焰 NO_x 生成规律

Fig. 6 NO_x emission characteristics of partially flame

火焰长度与火焰 NO_x 生成之间存在着密切联系,如图7所示给出了火焰长度随振幅变化的关系,从图中可以看出,1)火焰在声的作用下长度小于稳态火焰长度.这说明声作用导致的掺混效果增强使得火焰高温区域(火焰长度)减小,即 NO_x 生成区域减小,从空间区域的角度降低了 NO_x 的生成.

2)从火焰长度来看,在相同频率下,随着振幅的增加,火焰长度逐渐减小,振幅与火焰长度之间存在线性关系,且这一线性关系与 $EINO_x \propto p_A$ 是一致的.这说明,火焰长度的变化表征了火焰高温区域的变化情况,导致了 EINO_x 生成的变化,在部分预混火焰中,火焰长度越大, EINO_x 也越大.

2.2 声场频率对火焰 NO_x 生成的影响

如图8所示给出了不同振幅声场下的频率与 EINO_x 之间的关系,火焰 EINO_x 与频率存在线性变化关系,且该关系满足:

$$EINO_x \propto kf + b, k \in [0.01, 0.03], b \in [0.4, 0.5].$$

火焰 EINO_x 与频率之间存在正相关的原因在于,频率越低,在同样声场振幅作用下,火焰长度越小,如图7所示,在 $f=30$ Hz 的声作用下,火焰长

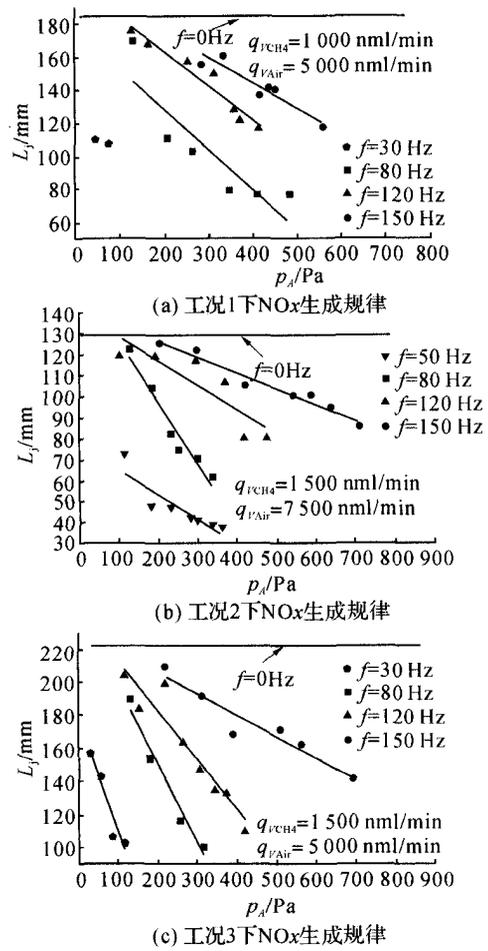


图7 声场振幅变化与火焰长度之间关系

Fig. 7 Relationship between flame length and acoustic amplitude

度是最小的,这说明低频的声作用更有效地降低了火焰长度,使得火焰 NO_x 生成的时间(高温区域停留时间)和空间(高温区域)上都受到了限制.

在低频声作用于火焰的过程中,火焰出现了局部熄火的现象.如图9所示给出了火焰在相近振幅(345±10 Pa)的情况下, $f=80\sim 280$ Hz 的火焰直拍图像.从直拍图像中可以看出,在相同振幅下,随着声场频率的增加,声对火焰流场的影响逐渐减弱,火焰在 $f=80$ Hz 工况下明显发生了较大程度的褶皱,该褶皱程度明显强于 $f=120, 150$ Hz.

当 $f=80$ Hz 时火焰区域明暗差别强于 $f=120, 150$ Hz 工况,这说明火焰局部温度存在较大差异,可以认为火焰局部发生了熄火现象^[22-23],这是使得 NO_x 生成降低的一个重要原因^[24-25].

同时,如图10所示给出了不同频率下火焰的温度 T 分布,温度采样点设置于燃烧器出口上方 60 mm,横坐标为水平位置,0 mm 表示燃烧器出口中心,正负表示燃烧器的左右两侧.可以发现,稳态 ($f=0$ Hz)下火焰锋面的最高温度明显高于声作用

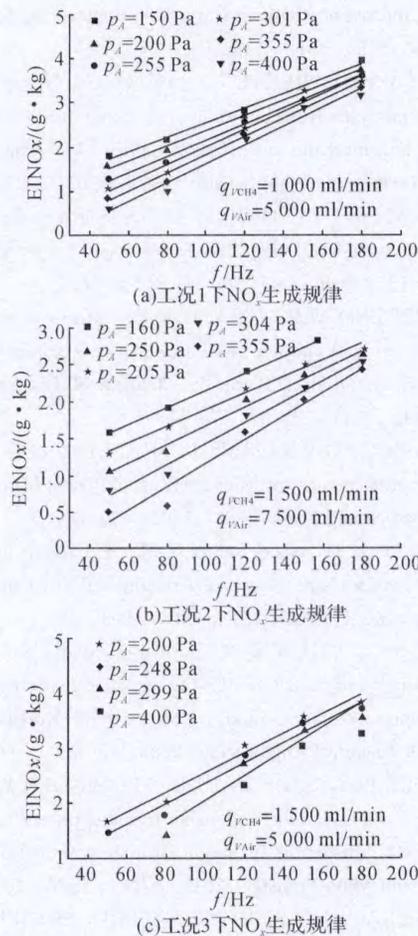


图 8 不同声场振幅下频率域 NO_x 生成特性

Fig. 8 NO_x emission characteristics under different acoustic amplitudes



图 9 345±10 Pa 下不同频率的火焰直拍照片

Fig. 9 Flame direct images of flame under different frequencies (345±10 Pa)

下的火焰,进一步从温度的角度解释了声作用降低 NO_x 生成的原理; $f=80$ Hz 声场作用下的火焰锋面温度、平均温度明显均低于 $f=150$ Hz 声场作用下的火焰,这与前述 EINO_x 的变化规律是一致的,温度的降低,使得 $f=80$ Hz 声作用下火焰 EINO_x 低于 $f=150$ Hz 声作用下火焰;在 $f=80$ Hz 声作用下火焰在 0 mm 处的温度明显高于稳态 ($f=0$ Hz) 和 $f=150$ Hz 声作用下火焰,其原因在于火焰长度明显降低,温度测温点已经接近 $f=80$ Hz 声作用下火焰的锋面(轮廓线)区域,其温度明显高于

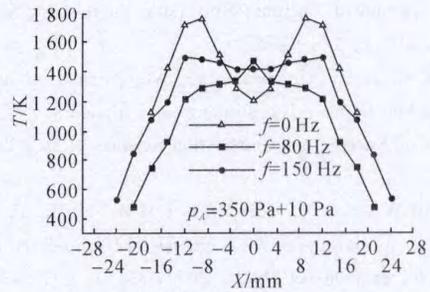


图 10 不同频率下火焰温度分布

Fig. 10 Flame temperature distribution under different frequency

火焰内部温度。

3 结 论

本文通过对频率 $f=0\sim 180$ Hz、振幅 $p_A=0\sim 1\ 000$ Pa 的声场作用影响部分预混火焰 NO_x 生成特性的实验,获得了声场频率、振幅与部分预混火焰 EINO_x 的定量关系,通过火焰长度和火焰形态的分析探讨了火焰 EINO_x 随频率和振幅变化的原因,提出了以下结论:

(1) 声作用下的部分预混火焰 EINO_x 明显小于稳态 ($f=0$ Hz) 部分预混火焰,其原因在于声的作用强化了火焰与周围气体的掺混,使得火焰在高温区域停留时间和高温区域几何尺寸都减小,在时间和空间上同时限制了 NO_x 生成;

(2) 在频率 $f=0\sim 180$ Hz、振幅 $p_A=0\sim 1\ 000$ Pa 的声作用下,相同频率声场作用下的部分预混火焰 EINO_x 随振幅的增加而减小,且满足 $EINO_x \propto kp_A + b, k \in [-0.009, -0.003], b \in [1, 5]$,原因在于振幅的增加使得火焰掺混效果明显增强,火焰长度急剧减小,高温区域减小,在时间和空间上进一步减小了 NO_x 的生成。

(3) 在频率 $f=0\sim 180$ Hz、振幅 $p_A=0\sim 1\ 000$ Pa 的声作用下,相同振幅声场作用下的部分预混火焰 EINO_x 随频率的增加而增加,且满足关系式 $EINO_x \propto kf + b, k \in [0.01, 0.03], b \in [0.4, 0.5]$,原因在于频率越大,声对火焰的影响效果越小,火焰长度越长;频率越小,声的作用促使火焰产生更多褶皱,出现局部熄火,降低了 NO_x 的生成。

参考文献 (References):

[1] 周俊虎, 汪洋, 杨卫娟, 等. 不同外部风温对微尺度火焰的影响[J]. 浙江大学学报:工学版, 2011. 45(1): 146-151.
 ZHOU Jun-hu, WANG Yang, YANG Wei-juan, et al. Effect of external wind temperature to micro-scale flame

- [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2011, 45(1): 146 - 151.
- [2] TURNS S R, Understanding NO_x formation in non-premixed flames: Experiments and modeling [J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1995, 21(5): 361 - 385.
- [3] DE ZILWA S R N, EMIRIS I, UHM J H, Et al. Influence of oscillations on NO_x emissions from ducted flames [J]. *Experiments in Fluids*, 2002, 32(4): 453 - 457.
- [4] KIM H K, KIM Y. Studies on combustion characteristics and flame length of turbulent oxy-fuel flames [J]. *Energy & Fuels*, 2007, 21(3): 1459 - 1467.
- [5] MEUNIER P, COSTA M, CARVALHO M G. The formation and destruction of NO in turbulent propane diffusion flames [J]. *Fuel*, 1998, 77(15): 1705 - 1714.
- [6] WEILAND N, CHEN R H, STRAKEY P. Effects of coaxial air on nitrogen-diluted hydrogen jet diffusion flame length and NO_x emission [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 2983 - 2989.
- [7] LI G, GUTMARK E J. Effect of exhaust nozzle geometry on combustor flow field and combustion characteristics [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2893 - 2901.
- [8] LEE D, PARK J k, JIN J, et al. A simulation for prediction of nitrogen oxide emissions in lean premixed combustor [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(7): 1871 - 1878.
- [9] CHAO Y C, HUANG Y W, WU D C. Feasibility of controlling NO_x emissions from a jet flame by acoustic excitation [J]. *Combustion Science And Technology*, 2000, 158: 461.
- [10] TASHTOUSH G T. Effect of acoustics on NO_x emission in premixed flame, experimental study [J]. *Energy & Environment*, 2003, 14(4): 451 - 460.
- [11] HASSAN M I, WU T W, SAITO K. A combination effect of reburn, post-flame air and acoustic excitation on NO_x reduction [J]. *Fuel*, 2013, 108: 231 - 237.
- [12] BAGHERI SADEGHI N, SHAHSAVARI M, FARSHCHI M. Experimental characterization of response of lean premixed low-swirl flames to acoustic excitations [J]. *International Journal Of Spray And Combustion Dynamics*, 2013, 5(4): 309 - 327.
- [13] OH J, HEO P, YOON Y. Acoustic excitation effect on NO_x reduction and flame stability in a lifted non-premixed turbulent hydrogen jet with coaxial air [J]. *International Journal Of Hydrogen Energy*, 2009, 34(18): 7851 - 7861.
- [14] 梁军辉, 黄群星, 冯玉霄, 等. 氧体积分数对乙烯扩散火焰中烟黑生成影响的实验 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2012, 46(8): 1465 - 1472.
- LIANG Jun-hui, HUANG Qun-xing, FENG Yu-xiao, et al. Experimental analysis of the effect of oxygen concentration on soot formation in ethylene diffusion flame [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2012, 46(8): 1465 - 1472.
- [15] COSTA M, PARENTE C, SANTOS A. Nitrogen oxides emissions from buoyancy and momentum controlled turbulent methane jet diffusion flames [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2004, 28(7): 729 - 734.
- [16] KIM M, OH J, YOON Y. Flame length scaling in a non-premixed turbulent diluted hydrogen jet with coaxial air [J]. *Fuel*, 2011, 90(8): 2624 - 2629.
- [17] LORETERO M E, HUANG R F. Effects of acoustic excitation and annular swirl strength on a non-premixed and swirl-stabilized flame [J]. *Journal of Energy Engineering*, 2013, 139(4): 329 - 337.
- [18] MIKOFSKI M, WILLIAMS T, SHADDIX C et al. Flame height measurement of laminar inverse diffusion flames [J]. *Combustion and Flame*, 2006, 146(1/2): 63 - 72.
- [19] MORCOS V H, Abdel-Rahim Y M. Parametric study of flame length characteristics in straight and swirl light-fuel oil burners [J]. *Fuel*, 1999, 78(8): 979 - 985.
- [20] KIM S C, CHUN Y N. Improvement of combustion efficiency and reduction of NO_x emission by external oscillation of reactants in an oil burner [J]. *Korean Journal Of Chemical Engineering*, 2008, 25(1): 73 - 77.
- [21] MOSEL K G, SCHWING J E, FENNINGER W J, et al. Influence of heat and mass transfer on the ignition and NO_x formation in single droplet combustion [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2011, 47(8): 1065 - 1076.
- [22] FEITELBERG A S, STARKEY M D, SCHIEFER R B, et al. Performance of a reduced NO_x diffusion flame combustor for the MS5002 gas turbine [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme*, 2000, 122(2): 301 - 306.
- [23] 钟英杰, 邓凯, 李华, 等. 声场作用下甲烷部分预混火焰 NO_x 生成特性实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(9): 1609 - 1612.
- ZHONG Ying-Jie, DENG Kai, LI Hua, et al. Experimental study of NO_x emission in partially premixed flame under acoustic forcing [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(9): 1609 - 1612.
- [24] 沈忠良, 邓凯, 卢冰, 等. 声场作用下甲烷部分预混火焰不同当量比和流速对 NO_x 生成的影响 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(5): 54 - 60.
- SHEN Zhong-liang, DENG Kai, LU Bing, et al. Effects of equivalence ratio and velocity on NO_x emissions in methane partially premixed flames with acoustic excitation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(5): 54 - 60.
- [25] 邓凯, 钟英杰, 李华, 等. 甲烷自激励脉动燃烧 NO_x 排放特性的试验研究 [J]. *动力工程学报*. 2010, 30(7): 528 - 535.
- DENG Kai, ZHONG Ying-jie, LI Hua, et al. Experimental study on NO_x emission from methane self-excited pulsating combustion [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2010, 30(7): 528 - 535.