

脉动燃烧抑制乙炔扩散火焰碳烟排放的研究

孙钊伟,赵伟炳,张治国,叶阳辉,范志庚

(浙江科技学院 机械与能源工程学院,杭州 310023)

摘要: 针对乙炔燃烧高碳烟排放的问题,提出对火焰施加脉动波以抑制碳烟的生成并对抑制效果进行了研究。分析了振幅、频率、喷嘴内径、燃料流量和波形对碳烟抑制效果的影响。结果表明:随着振幅的增大,碳烟生成量明显下降;当施加频率为 40 Hz、振幅为 0.02 V 的脉动波时,碳烟抑制率超过 90%;在振幅不变的情况下,碳烟抑制率先随频率的增大而增大,在频率为 40 Hz 的条件下,抑制率最优,而后随频率的增大开始下降,当频率大于 80 Hz 时基本上不变;喷嘴内径与碳烟生成量没有明显的相关性;在其他条件不变时,采用相对较小的燃料流量,脉动对碳烟生成的抑制效果更好;在锯齿波、方波、正弦波 3 种波形中,方波对碳烟生成的抑制效果最好。扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)结果表明,脉动燃烧可以抑制碳烟颗粒的团聚和促进碳烟颗粒的氧化,使其颗粒变小,最终达到抑制碳烟生成的目的。因此,脉动燃烧是一种抑制碳烟生成的有效手段,可为燃烧污染控制提供参考。

关键词: 碳烟;脉动燃烧;扩散火焰;乙炔

中图分类号: TK223.2

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2021)03-0198-06

Soot suppression of acetylene diffusion flames by pulse combustion

SUN Kewei, ZHAO Weibing, ZHANG Zhiguo, YE Yanghui, FAN Zhigeng

(School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of
Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the problem of high soot emission from acetylene combustion, the study proposed a method of applying pulsating wave to acetylene diffusion flames to suppress the generation of soot, and then investigated the effect of amplitude, frequency, internal diameter of the nozzle, flow rate of the fuel and wave shapes on the soot suppression. The results show that with the increase of amplitude, the soot emission is decreased obviously. In

收稿日期: 2020-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51776188)

通信作者: 张治国(1980—),男,安徽省寿县人,教授,博士,主要从事能源与环境系统工程研究。E-mail:107023@zust.edu.cn。

case of frequency being 40 Hz and amplitude being 0.02 V, the soot suppression rate exceeds 90%. When a fixed amplitude is applied, the soot suppression rate increases with the increase of the frequency, and reaches the optimal in case of frequency being 40 Hz. From 40 to 80 Hz, the soot suppression rate is on the decline, and has no change when frequency being greater than 80 Hz. The internal diameter of the nozzle has little effect on the soot suppression. When other conditions remain unchanged, the soot suppression is enhanced at a relatively lower flow rate of the fuel by pulse combustion. Among three waves shapes of saw tooth wave, square wave and sine wave, square wave has the best performance on soot suppression. The results of scanning electron microscope(SEM) show that pulse combustion can suppress agglomeration of soot particles, accelerate soot oxidation and decrease the size of soot particles, thus leading to soot suppression. Therefore, pulse combustion is an effective way to suppress the generation of soot, which can provide a reference for the combustion pollution control.

Keywords: soot; pulse combustion; diffusion flame; acetylene

非预混火焰被广泛应用于各种燃烧装置中,但它会产生很多污染物,碳烟是主要有害污染物之一。碳烟不仅会造成严重的空气污染^[1-2],而且会降低燃烧室的燃烧效率,增加燃烧室壁面的热负荷^[3]。因此,如何有效地抑制碳烟颗粒的排放成为燃烧科学研究的中心课题之一。从燃烧控制的角度来看,可通过调控温度、压力和当量比等参数来调控燃烧过程,进而改变污染物的排放特性^[4-6]。实际应用中还可通过改进燃料的配比来降低碳烟颗粒的生成,包括降低燃料中芳香烃组分、采用含氧燃料、掺杂添加剂等。此外,采用催化氧化、颗粒过滤捕集技术等尾气后处理技术也同样可以降低碳烟的排放量^[7],还有文献报道采用外加电场的方式也可以降低燃烧过程中碳烟颗粒的生成与排放^[8]。

脉动燃烧作为一种控制火焰的有效手段受到了广泛的关注。对火焰施加脉动波会影响火焰的结构和化学水平上的燃烧过程,从而导致火焰颜色和产物发生变化^[9-10]。此外,在高噪声级的燃烧器中,自激励脉动可能导致严重的燃烧不稳定现象^[11]。通过主动控制可以实现对脉动燃烧热声不稳定情况的调整,达到燃烧效率更高,使用寿命更长,降低噪声,改善运行环境的目的^[12-13]。Sapmaz等^[14]通过使用电磁阀来产生频率在10~200 Hz之间变化的脉动波并施加到预混火焰中,发现碳烟体积分数随着脉动波频率的增加而增加。Saito等^[15]得出了相似的结论,并得出声波脉动可促进空气与燃料的混合并提高火焰温度,使碳烟颗粒再氧化,从而减少碳烟生成的结论。Alex^[16]开展了一项对贫氧燃烧火焰施加脉动波的研究,发现施加脉动后会引引起火焰温度升高,NO_x生成量增加,CO生成量减少,这一结果印证了Satio的猜想。然而,Shaddix等^[17]的研究认为,碳烟体积分数和碳烟颗粒的尺寸比非脉动燃烧火焰增加了2~4倍,是因为受到火焰停留时间增加的影响,这与Sapmaz和Saito等的结论相左。Jocher等^[18]对脉动层流火焰中碳烟演化的数值模拟的研究也得出了与Shaddix相似的结论。由此可见,脉动燃烧是否可以有效抑制碳烟生成还存在争议,因此需要进一步的研究。因此,本研究通过改变脉动波的振幅、频率、不同波形、喷嘴内径和燃料流量等参数,对脉动燃烧火焰在不同燃烧器结构和声源参数下的碳烟抑制情况进行探究,以期找到一种抑制火焰中碳烟生成的有效方法。

1 试验部分

1.1 试验仪器

玻璃管(外径34 mm,内径20 mm),扬声器(东莞市华创音响器材有限公司,DL50TZF-01),压电式压力传感器(昆山双桥传感器测控技术有限公司,CYG1406),电子天平(德国赛多利斯电子天平,BSA2245-CW),玻璃纤维滤膜,喷嘴(不锈钢管,内径分别为2.5、7.0 mm),本生灯,质量流量计(美国艾里卡特(Alicat)高精度气体质量流量计,M-500SLPM),真空泵。

1.2 试验过程

试验使用的燃料为乙炔气体。乙炔气体从气瓶中流出后,由质量流量计控制流量 Q 在 $(0.05 \sim 0.07 \text{ L/min})$ 内变化,并在本生灯处点燃。在乙炔扩散火焰两边设置两端分别安装了扬声器的玻璃管,利用 LabVIEW 程序控制扬声器产生的干涉波(锯齿波、方波、正弦波)对乙炔扩散火焰施加脉动波。脉动波的频率 f 和振幅 A 分别在 $40 \sim 120 \text{ Hz}$ 和 $0 \sim 0.14 \text{ V}$ 范围内变化。用压电式压力传感器对扬声器产生的振幅和波形进行测量和校准。燃烧产生的碳烟颗粒采用玻璃纤维过滤器进行收集。脉动燃烧抑制乙炔扩散火焰碳烟生成试验如图 1 所示。

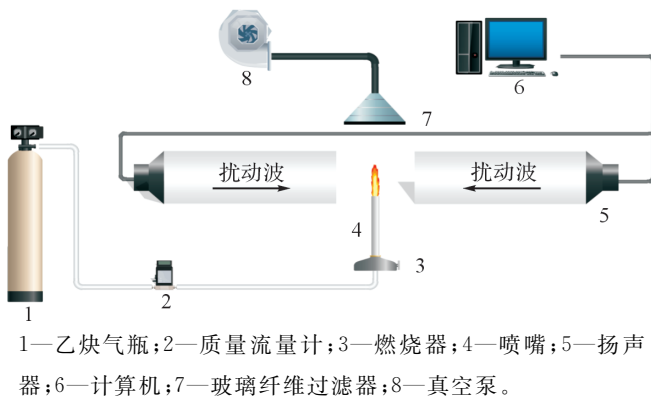


图 1 脉动燃烧抑制乙炔扩散火焰碳烟生成试验示意图

Fig. 1 Diagram of soot suppression of acetylene diffusion flames by pulse combustion

1.3 分析方法

使用精度为 0.1 mg 的电子天平对收集到的碳烟颗粒的质量进行标定。采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分析收集到的碳烟的物理化学性质。

2 结果与讨论

2.1 施加脉动波前后的火焰情况

脉动波的频率设定为 100 Hz , 振幅从 0 V 增大到 0.07 V , 燃料流量为 0.06 L/min , 喷嘴内径为 7.0 mm 。乙炔扩散火焰在施加脉动波前后的火焰形状如图 2 所示, 从图中可以看出, 在不施加脉动波时, 火焰上方有大量的碳烟生成; 施加脉动波后, 随着振幅的增大, 火焰长度逐渐减小, 当振幅达到 0.07 V 时, 几乎没有碳烟产生。由此可见, 使用脉动燃烧技术可以有效地抑制乙炔扩散火焰产生的碳烟, 这与前人的研究结果^[15]一致。

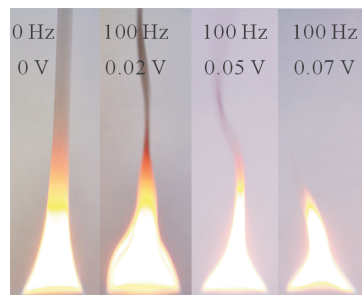


图 2 施加脉动波前后的火焰形状

Fig. 2 Shape of flame before and after pulse is applied

2.2 施加脉动波后不同参数条件对碳烟抑制效果的影响

2.2.1 振幅对碳烟抑制效果的影响

施加脉动波的频率和振幅的变化范围分别为 $40 \sim 120 \text{ Hz}$ 和 $0 \sim 0.14 \text{ V}$, 燃料流量为 0.06 L/min , 喷嘴内径为 7.0 mm 。振幅对碳烟抑制效果的影响如图 3 所示, 其中, 碳烟生成量比为脉动燃烧时产生的碳烟质量(m_1)与未加脉动燃烧产生的碳烟质量(m_2)的比值, 从图中可以看出, 随着振幅的增大, 碳烟的抑制效果得到了明显的提升。当频率为 40 Hz , 振幅小于 0.01 V 时, 施加脉动波不会引起碳烟生成量的显著下降; 然而, 当振幅大于 0.015 V 时, 碳烟生成量迅速减少, 且在振幅为 0.02 V 时碳烟抑制率超过 90% 。而在频率为 120 Hz 的条件下, 需要施加 0.14 V 的振幅来达到相似的碳烟抑制率。产生这一现象的原因可能是相比低振幅, 高振幅条件下的碳烟在生成区的生长和团聚受到的抑制作用更大, 且剧烈震荡使碳烟颗粒得到充分的氧化, 使碳烟颗粒的粒径减小。

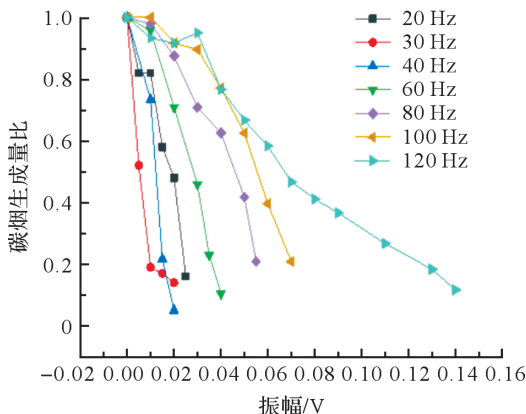


图 3 振幅对碳烟抑制效果的影响

Fig. 3 Effect of amplitude on soot suppression

2.2.2 频率对碳烟抑制效果的影响

施加脉动波的频率和振幅的变化范围分别为 40 ~ 120 Hz 和 0.02 V, 燃料流量为 0.06 L/min, 喷嘴内径为 7.0 mm。不同频率对碳烟抑制效果的影响如图 4 所示, 从图中可以看出, 碳烟的抑制率首先随频率的增大而增大, 在频率为 40 Hz 的条件下碳烟抑制率达到最优值。但随频率的增大, 碳烟抑制率开始下降; 当频率大于 80 Hz 时, 继续增加频率, 碳烟的抑制率基本上不变。产生这一现象的原因可能是乙炔燃烧产生的固有频率接近 40 Hz, 与扬声器产生的脉动频率之间发生耦合^[19]。这使得乙炔扩散火焰产生的碳烟与氧气得到了更充分的混合, 碳烟颗粒的氧化更充分, 从而导致低频条件下的碳烟抑制效果更明显。

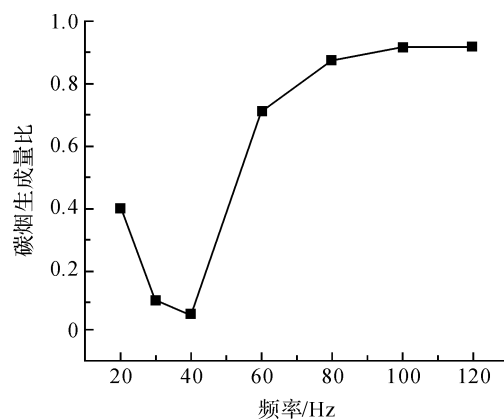


图 4 频率对碳烟抑制效果的影响

Fig. 4 Effect of frequency on soot suppression

2.2.3 喷嘴内径对碳烟抑制效果的影响

施加脉动波的频率为 60、100 Hz, 振幅变化范围为 0 ~ 0.08 V, 燃料流量为 0.06 L/min, 喷嘴内径分别为 2.5、7.0 mm。不同喷嘴内径对碳烟抑制效果的影响如图 5 所示, 从图中可以看出, 在振幅和频率保持不变的情况下, 7.0 mm 和 2.5 mm 内径的喷嘴表现出了相同的碳烟抑制效果, 这说明喷嘴内径对碳烟抑制效果不会产生明显的影响。

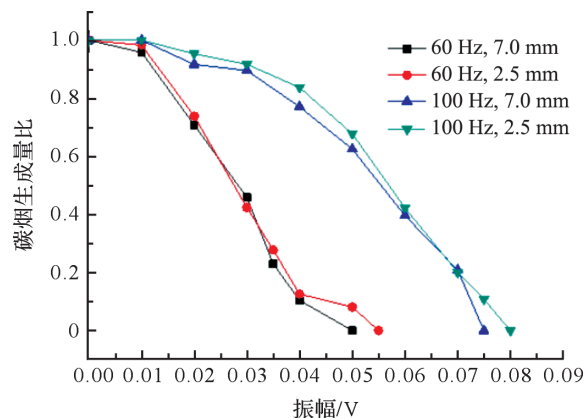


图 5 喷嘴内径对碳烟抑制效果的影响

Fig. 5 Effect of internal diameter of the nozzle on soot suppression

2.2.4 燃料流量对碳烟抑制效果及碳烟颗粒的影响

施加脉动波的频率为 60 Hz, 振幅在 0.01 ~ 0.03 V 内变化, 燃料流量在 0.05 ~ 0.07 L/min 内变化, 喷嘴内径为 7.0 mm。不同燃料流量对碳烟抑制效果的影响如图 6 所示, 从图中可以看出, 与大燃料流量相比, 当燃料流量较小时, 碳烟抑制效果更好。初步分析这

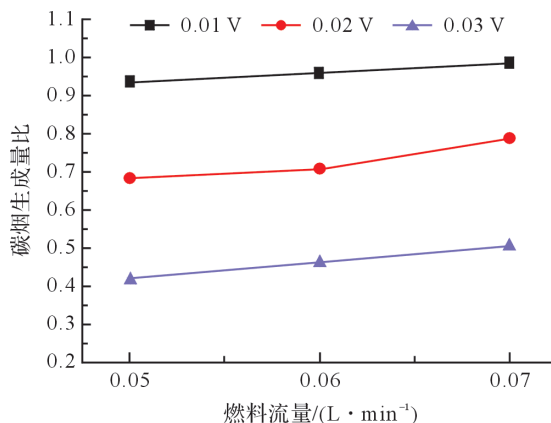


图 6 燃料流量对碳烟抑制效果的影响

Fig. 6 Effect of flow rate of the fuel on soot suppression

可能是小燃料流量的火焰停留时间较短, 有利于碳烟在最后过程的氧化。而大燃料流量(0.07 L/min)产生的乙炔扩散火焰的长度和火焰停留时间都要大于小燃料流量(0.05 L/min)时的情况。这一情况使小燃料流量的碳烟前驱物更容易得到氧化, 碳烟生长和团聚受到的抑制效果比大燃料流量时好。

(0.06 L/min), 颗粒开始团聚并逐渐形成块状; 当燃料流量增大为 0.07 L/min 时, 碳烟颗粒已经明显团聚成块。初步分析出现此现象的原因为碳烟在上升到高温火焰区域时, 由于流量过大, 导致火焰停留时间更长, 碳烟未能到达形成颗粒状时就被气流推出火焰, 不利于碳烟最后过程的氧化, 同时燃料在其中不完全燃烧, 导致出现大块状碳烟^[20]。

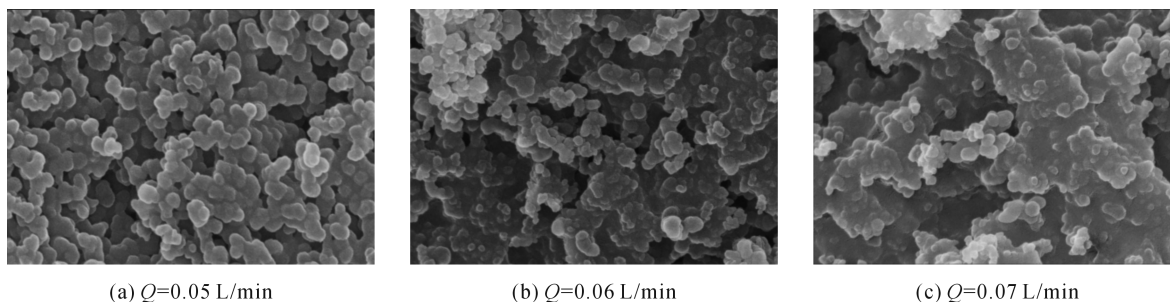


图 7 不同燃料流量下的碳烟颗粒 SEM 图

Fig. 7 SEM image of soot particles under different fuel rates

2.2.5 不同脉动波波形对碳烟抑制效果的影响

施加的脉动波频率和振幅分别在 40~80 Hz 和 0~0.08 V 范围内变化, 施加的脉动波分别为正弦波、方波和锯齿波, 燃料流量为 0.06 L/min。不同脉动波波形对碳烟抑制效果的影响如图 8 所示。

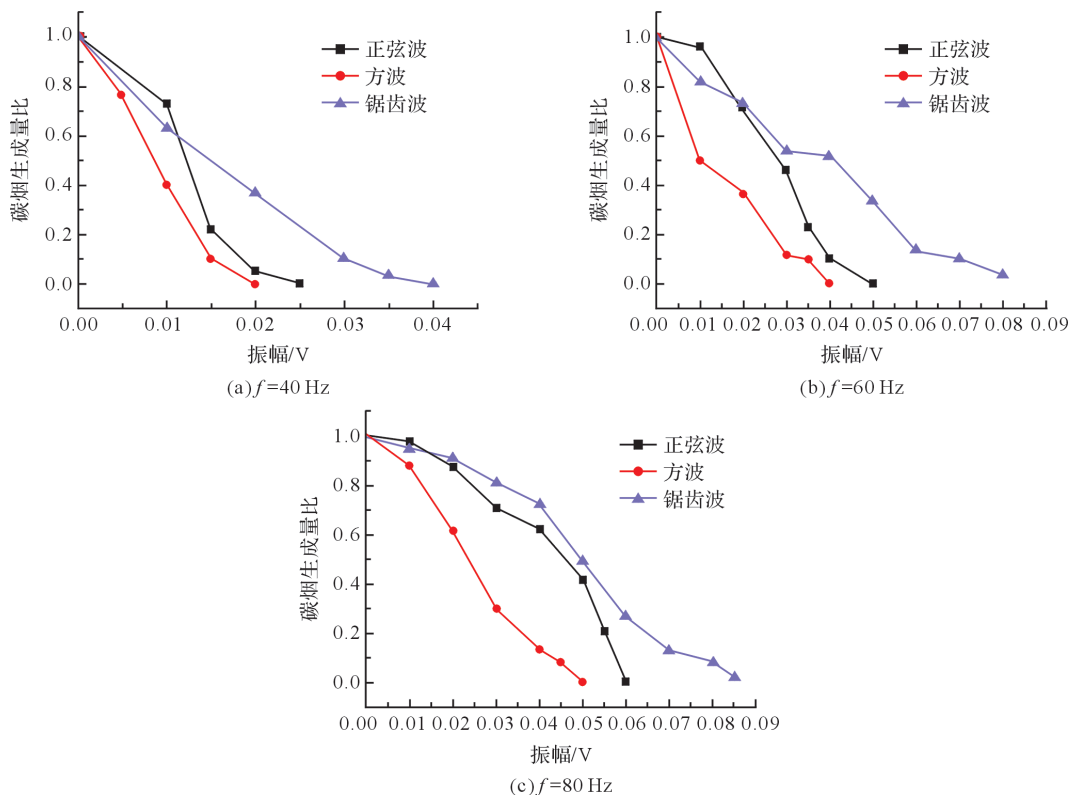


图 8 不同脉动波波形对碳烟抑制效果的影响

Fig. 8 Effect of wave shapes on soot suppression

从图 8 中可以看出, 相比正弦波, 锯齿波在一开始时的抑制效果要好一些; 但随着振幅的增大, 正弦波的碳烟抑制效果逐渐超过了锯齿波; 在 3 种波形中, 方波具有最好的碳烟抑制效果, 锯齿波的碳烟抑制效果最差。产生这种现象的原因可能是方波在 3 种波中具有最大的能量, 在施加方波时乙炔扩散火焰中产生的碳烟颗粒震荡更为剧烈, 碳烟颗粒氧化得更加充分。

3 结 语

本研究针对乙炔燃烧高碳烟生成的问题, 通过改变脉动波的振幅、频率及喷嘴内径、燃料流量和波形

等参数来探讨脉动燃烧对碳烟抑制效果的影响。结果显示:通过增大脉动波的振幅,选用合适的频率,并根据振幅和频率来选用合适的波形有利于抑制乙炔扩散火焰碳烟的生成。经扫描电子显微镜分析收集到的碳烟,其结果表明,脉动燃烧可以抑制碳烟颗粒的团聚和促进碳烟颗粒的氧化,使其颗粒变小,最终达到抑制碳烟生成的目的。本研究为抑制火焰中碳烟生成提供了一种新方法。

参考文献:

- [1] 熊刚. 煤和生物质燃烧碳烟生成的实验研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [2] 朱吉祥,徐冉,张琳,等. 可吸入颗粒物 $PM_{2.5}$ 的影响因子分析[J]. 环境卫生工程,2016,24(1):59.
- [3] 王力军,杨海峰,孙远伟,等. 某重型燃气轮机碳烟生成和排放研究[J]. 燃气轮机技术,2014,27(3):19.
- [4] Ikegami M, Shioji M, Kimoto T. Diesel combustion and the pollutant formation as viewed from turbulent mixing concept[J]. Journal of Engine,1989,97(6):715.
- [5] 罗灿,林雨,寇斌达,等. 循环流化床锅炉炉膛内烟气浓度场模型计算[J]. 热力发电,2016,45(1):105.
- [6] 王浒. 柴油机碳烟生成机理多维数值模拟及试验研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [7] Wallner T, Miers S A, McConnell S. A Comparison of ethanol and butanol as oxygenates using a direct-injection, spark-ignition engine[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power,2009,131(3):32802.
- [8] Saito M, Arai T, Arai M. Control of soot emitted from acetylene diffusion flames by applying an electric field[J]. Combustion and Flame,1999,119(3):356.
- [9] Farhat S A, Ng W B, Zhang Y. Chemiluminescent emission measurement of a diffusion flame jet in a loudspeaker induced standing wave[J]. Fuel,2005,84(14/15):1760.
- [10] Rocha A M A, Carvalho J A, Lacaiva P T. Gas concentration and temperature in acoustically excited Delft turbulent jet flames[J]. Fuel,2008,87(15/16):3433.
- [11] Kim K T, Lee J G, Quay B D, et al. Response of partially premixed flames to acoustic velocity and equivalence ratio perturbations[J]. Combustion and Flame,2010,157(9):1731.
- [12] 王泽. Helmholtz 型脉动燃烧器热声耦合特性数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [13] 刘训臣,王国情. 强声激励下旋流火焰周期性流动结构的实验研究[J]. 实验流体力学,2020,34(3):53.
- [14] Sapmaz H, Lin C X, Ghennai C. Measurements of soot volume fraction in pulsed diffusion flame by laser induced incandescence[J]. Experiments in Fluids,2008,44(1):137.
- [15] Saito M, Sato M, Nishimura A. Soot suppression by acoustic oscillated combustion[J]. Fuel,1998,77(9/10):973.
- [16] Asterio R B, Alex A B S, Lilian L N G, et al. Experimental evaluation of CO, NO, formaldehyde and acetaldehyde emission rates in a combustion chamber with OEC under acoustic excitation[J]. Energy Reports,2019,5:1163.
- [17] Kaplan C R, Shaddix C R, Smyth K C. Computations of enhanced soot production in time-varying CH_4 /air diffusion flames[J]. Combustion and Flame,1996,106(4):392.
- [18] Jocher A, Foo K K, Sun Z W, et al. Impact of acoustic forcing on soot evolution and temperature in ethylene-air flames[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2017,36(1):781.
- [19] Renard P H, Thevenin D, Rolon J C, et al. Dynamics of flame/vortex interactions[J]. Energy and Combustion Science,2000,26(3):225.
- [20] Reilly P T A, Gieray R A, Whitten W B, et al. Fullerene evolution in flame-generated soot[J]. Journal of the American Chemical Society,2000,122(47):11596.