

NH₃/C₃H₈ 流动状态下的激光点火及燃烧特性

张俊杰, 陈子豪, 胡二江, 黄佐华

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 本研究基于流动点火平台, 在不同当量比和丙烷掺混比条件下, 使用激光点火的方式, 对 NH₃/C₃H₈ 预混合气的火焰发展过程、最小点火能量(MIE)、CH^{*}发展及分布、火焰发展面积及发展速度进行了研究。结果表明, 当量比对 MIE 的影响为非线性, 其最小值随掺混比提高而逐渐向较浓一侧移动, 提高掺混比对 MIE 的影响逐渐减小; CH^{*}主要分布在火焰边界及“三瓣”火焰连接处等反应较强区域, 当量比对 CH^{*}的峰值时间影响较掺混比更大; 混合气较浓时易出现回火, 而混合气过稀时火焰抖动严重, 循环变动更大; 随当量比和掺混比提高, 火焰前端速度增加明显, 而后端由于受来流阻力和前端火焰流出影响, 火焰面更不规则。

关键词: 激光点火; 最小点火能量; 氨气; 火焰发展; CH^{*}; 流动点火

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)06-0592-09

Laser Ignition and Combustion Characteristics in NH₃/C₃H₈ Flow

Zhang Junjie, Chen Zihao, Hu Erjiang, Huang Zuohua

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: This study, based on a flow ignition platform, investigates the flame development process, minimum ignition energy (MIE), CH^{*} emission and distribution, flame development area, and flame front velocity of NH₃/C₃H₈ premixed gas using laser ignition under various equivalence ratios and propane blending ratios. The results indicate that the effect of equivalence ratio on MIE is nonlinear, with its minimum value shifting towards the richer side as the blending ratio increases. The influence of increasing blending ratio on MIE gradually diminishes. CH^{*} is primarily distributed in regions with strong reactions, such as the flame boundary and the junction of the “three-lobed” flame. The equivalence ratio has a greater impact on the peak time of CH^{*} than the blending ratio. When the mixture is rich, backfire is likely to occur, whereas when the mixture is too lean, the flame experiences severe oscillations. As the equivalence ratio and blending ratio increase, the flame front velocity increases significantly, while the flame surface at the rear becomes more irregular due to the effects of incoming gas resistance and flame outflow from the front.

Keywords: laser ignition; minimum ignition energy; ammonia; flame development; CH^{*}; flow ignition

化石能源通过燃烧转换的能量是现代工业动力的重要来源之一, 化石能源的燃烧伴随着人类的多次技术革新与科技进步, 但传统化石能源的大量使用也

会使 CO₂ 排放量急剧增加, 作为导致温室效应的重要因素, 在众多研究中, 减少碳排放已被视为重要议题, 其中最根本、最直接的方法就是从源头减少对含

收稿日期: 2025-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52176131).

作者简介: 张俊杰(1998—), 男, 博士研究生, zhangjunjie0421@stu.xjtu.edu.cn.

通信作者: 胡二江, 男, 博士, 教授, hujiang@mail.xjtu.edu.cn.

碳燃料的依赖。

氨气是一种兼具“无碳”和“高氢”特征的能源, 燃烧后几乎不产生碳排放, 因此在燃料端具有减碳优势。它的液化条件简单, 能量密度相对较高, 运输经济性强, 同时可再生并能够直接燃烧于锅炉及燃气轮机中^[1-3]。合成氨技术的成熟推动了氨气的大规模生产和成本降低, 从而使其作为能源燃料的应用前景愈加广阔^[4-5]。

尽管氨气具备作为清洁燃料的潜力, 但在实际使用中仍存在若干问题。首先, 它的可燃区间有限且燃烧速率较慢, 这使得在一些苛刻条件下火焰难以保持稳定, 甚至会发生振荡或熄灭。其次, 氨气燃烧时常伴随较高的 NO_x 生成, 这些缺陷使其作为燃料的应用受到约束。

目前常见且较为有效的方法, 是在其中加入燃烧性能更好的小分子燃料进行掺混燃烧, 这能够显著改善其可燃性和火焰稳定性。而丙烷作为一种常见的燃料, 主要用作户外取暖、便携式炉灶和机动车的燃料, 其价格低廉、可以适应比较宽的温度范围。丙烷燃烧后产生的 CH^* 等也有助于 NH_2^* 的产生, 相较于氢气, 丙烷的热释放量也更大, 这都会加速氨气火焰的产生与传播。因此本文使用丙烷作为辅助燃料, 在流动状态下对氨气/丙烷预混合气进行激光点火实验研究。

氨气在应用中的另一难点是点火, 其低可燃性使得电火花点火的效果并不理想。除了通过添加高可燃性燃料改善混合气性质之外, 也可以采用高密度能量的点火方式来解决这一问题。激光点火便是一种高能点火技术, 它能够通过光学击穿效应快速产生等离子体, 引发燃料混合气的点火过程。这种方法不存在分子吸收波长匹配的限制^[6-7], 几乎不会带来电磁干扰^[8], 并且具备高度的可控性, 在时间和位置上都可以灵活调节, 从而有助于实现多点点火^[9-10]。尤其是在氨气接近稀燃极限、点火难度加大时, 激光点火更能体现其优越性。

目前对氨气及混合燃料的燃烧特性已有了广泛的研究。Lin 等^[11]在低压条件下对稀薄丙烷/空气混合气, 研究了多通道等离子体的方式对点火过程的增强, 研究发现在低压下多通道等离子体放电的点火概率更高, 不同布置形式对点火后结果也有影响。Wu 等^[12]对旋流燃烧器中氨/丙烷火焰的 NO_x 生成特性进行了研究, 发现在丙烷火焰中加入氨气会极大增加 NO_x 的生成, 而合理组织氨气掺混比则可以有效控制 NO_x 的生成。Wang 等^[13]研究了在不同的当量比、氨掺混比和初始压力下的氨/丙烷/空气混合物的燃烧特

性, 并优化了动力性机理, 结果表明氨气能有效减少 CO 和 CO_2 的排放, 且在较高 NH_3 摩尔分数条件下, 减少效果更为显著。Galia 等^[14]使用数值模拟的方法研究了等离子体对氨气点火的增强, 通过重整可以使氨气的点火延迟时间减少两个数量级。

通过现有成果可以看出, 氨气和丙烷的研究重点多集中于层流燃烧特性和排放特征, 而等离子体点火的对象主要是单一的烷烃类燃料, 并且大多是在静态条件下进行点火实验。相比之下, 对氨/丙烷燃料在流动环境中的点火特性研究相对不足。因此, 本实验以氨/丙烷燃料在流动条件下的点火与燃烧过程为研究核心, 以期对氨气在实际能源应用中的推广提供参考。

1 实验装置及数据处理

1.1 实验装置

本研究所采用的流动点火实验系统见图 1, 其主要由进/排气系统、光学测量系统、点火系统及数据采集系统构成。燃烧室设计为直径 4 cm 的方形通道, 预混的 $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ /空气混合气自入口进入, 经整流孔板均化后形成平稳流场。燃烧室两侧安装有石英玻璃窗口 (面积为 80 cm^2 , $20 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$), 便于采集燃烧过程中的图像。在下游区域额外通入氮气, 作为稀释介质以抑制火焰继续传播。

点火系统选用 Nd:YAG 灯泵浦纳秒调 Q 激光器 (Grace NASOR800), 实验中采用波长 532 nm 的激光脉冲。通过外部光路配置的能量衰减器可灵活调节激光能量, 而分光镜与两台能量计 (Coherent) 则用于实时能量监测。光路部分主要由 ICCD、 CH^* 滤光片以及高速摄像机 (Phantom V2012) 组成, 用于对燃烧特征进行成像与记录。实验所用空气来自高压气源, 燃料与稀释气体均由高压气瓶供给, 利用不同量程的质量流量控制器 (ALICAT) 进行精确控制。所用燃料气体的纯度不低于 99.999%。

1.2 实验工况

空气由高压气源压缩后供入实验系统, 燃烧室的初始条件为约 298 K 的温度和接近 0.1 MPa 的环境压力, 混合气流速控制在 1 m/s。在点火实验阶段, 为保证统计结果的可靠性, 每个工况均进行了 60 次以上的点火实验。相应的实验工况如表 1 所示。

1.3 数据处理

本实验中, 将入射能量 E_{in} 和透射能量 E_{tr} 之差记为点火能量 ($E = E_{in} - E_{tr}$), 最小点火能量 E_{MI} (minimum ignition energy), 是点火成功率达到 50% 时, 对应的点火能量, 可以使用逻辑回归方法对点火结果进

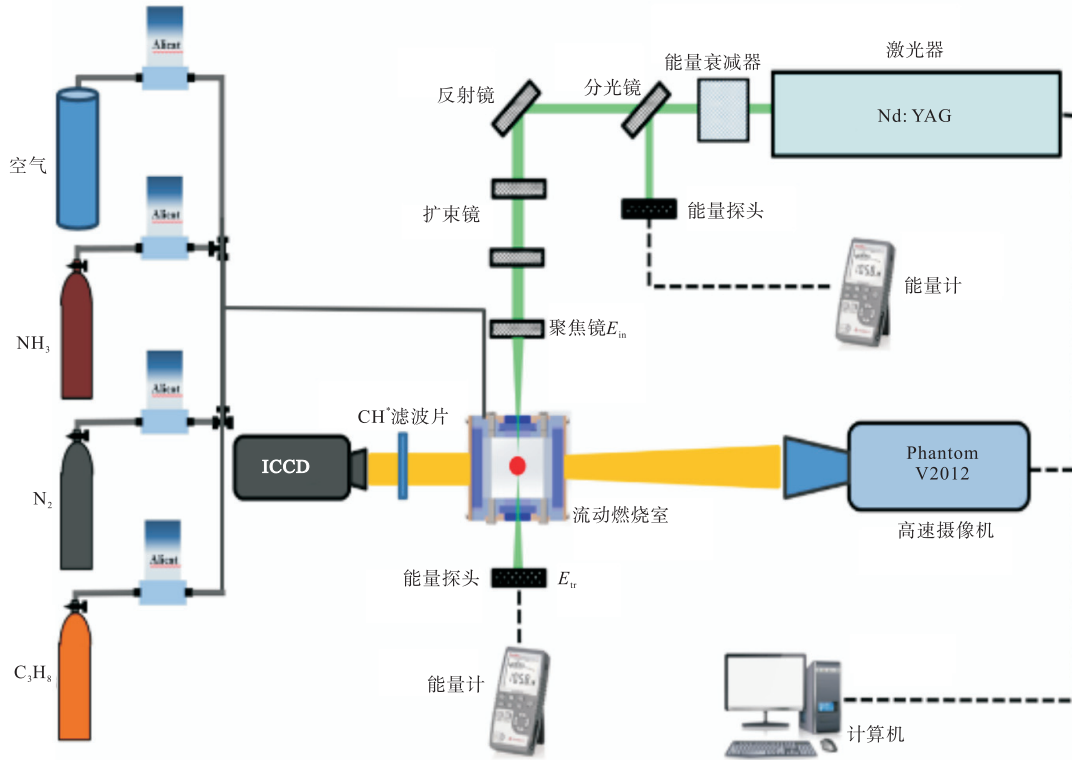


图 1 激光点火实验系统示意

Fig.1 Experimental system of laser ignition

表 1 实验工况

Tab.1 Experimental conditions

当量比 ϕ	掺混比 $\alpha_{C_2H_6}$
0.6, 0.7, 0.8, 0.9	0, 5%, 10%, 15%, 20%

行统计^[15], 在实验中, 当调整激光入射能量时, 会参考前一次的点火结果. 根据上次点火的成功或失败的结果, 相应地降低或升高下一次点火能量. 为了确保实验结果的可靠性, 每个实验条件下的测量点将进行至少 60 次实验.

在记录和处理数据时, 对于某一点火能量 x , 将点火结果 y 为成功的结果记为 1, 未成功的结果记为 0, 建立一个二值化结果模型, 其中 E 为点火成功的阈值, 具体函数关系式为

$$\begin{cases} y = 1 & x \geq E \\ y = 0 & x < E \end{cases} \quad (1)$$

定义函数 $P(x)$ 为点火能量为 x 时的结果累计概率分布:

$$P(x) = \text{Probability}(y = 1; x) \quad (2)$$

对于总计 n 次的实验结果, 点火能量 x 和点火结果 y 可以用似然函数 L 来表示:

$$L = \prod_{i=1}^n P(y_i = 1)^{y_i} (1 - P(y_i = 1))^{1 - y_i} \quad (3)$$

根据式 (2) 和 (3), $P(x)$ 可以用带参数的逻辑分布函数来表示, β_0 和 β_1 为似然函数的估计参数, 即

$$P(y = 1) = f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta_0 - \beta_1 x}} \quad (4)$$

根据拟合结果, 可以计算出 95% 置信区间的上、下置信限 (UCL/LCL), 图 2 是流速为 1 m/s、当量比为 0.8、掺混比为 10% 时的点火成功率曲线, 实验的原始数据在图中以蓝色菱形和红色圆形表示, 虚线所围成的蓝色区域代表置信区间, 后续图同理.

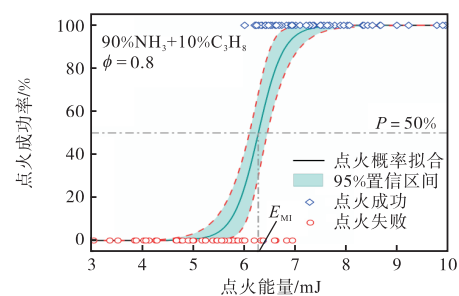


图 2 点火成功率处理结果示意

Fig.2 Schematic diagram of ignition results

2 最小点火能量

图 3 为当量比为 0.6~0.9 时, 不同掺混比混合气的最小点火能量, 虚线为不同掺混比下, E_{MI} 最小值的变化趋势. 从图中可以看到, 随着当量比增加, E_{MI} 会出现先降后升的非线性变化, 整体呈现出“U”

型^[16],因为在低当量比下分子碰撞几率会减小,若要电子雪崩及击穿的形成则需要加大入射能量;而在高当量比下,虽然分子碰撞几率增加,但火核向自维持火焰转变所需要的自由基数量也随之增加,所以当量比偏高和偏低都会导致 E_{MI} 增加^[17].

其次,随着掺混比的提高, E_{MI} 随当量比变化曲线的最小值也会逐渐向较浓一侧移动,说明随丙烷含量增加,混合气更易在当量比较高时点火成功,因为丙烷的可燃极限更宽,根据前述 E_{MI} 随当量比变化的趋势,丙烷的 E_{MI} 最小值所对应的当量比相较于氨气更高,所以丙烷能极大提高氨气的可燃性. 同时,当掺混比提高时, E_{MI} 最小值的降低幅度也逐渐减小,说明丙烷对氨气点火的促进作用也在逐渐减小,在超过 15% 时, E_{MI} 最小值的降低幅度只有 23.4%, 继续增加丙烷含量会导致收益降低,同时热释放和碳含量增加所带来的污染物增加问题都限制丙烷的含量不能过高.

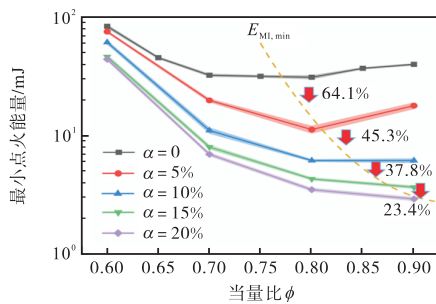


图 3 不同条件下的混合气最小点火能量

Fig.3 MIE of mixed gas under different conditions

3 混合气在流动状态下的火焰发展

激光点火的火焰呈现三瓣型,因为斜压矩的存在,会卷吸出光侧气体到进光侧^[18],在静止气体中,三瓣型火核较为明显,但对于流动过程,由于氨气火焰在初期发展较弱,且由于第三瓣火焰发展方向垂直于气流方向,所以在发展早期,第三瓣火焰便会消失,但在部分工况中可以存在较长的时间,其对火焰后续发展的影响可以忽略.

3.1 火焰发展形态

图 4 是当量比为 0.8, 掺混比为 5% 的 $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ 混合气不同时期的火焰发展图像,可以提取出火焰边界、面积及发展速度等结果,定义迎风一侧为火焰后端,出口一侧为火焰前端,后续同理. 本文将火焰发展过程分为 4 个阶段,分别为火核阶段、火焰快速发展阶段、火焰碰壁发展阶段和火焰流出阶段. 在“火核阶段 (flame kernel)”时,激光首先会击穿混合气并

形成等离子体,随后火核形成并发出极为明亮的光,之后火核体积会逐渐增大,同时会从等离子体发光转变为混合气的火焰发光,第三瓣火焰也会在此过程中逐渐消散;在火核完全转变为稳定的火焰后,会进入“快速发展阶段 (rapid expansion)”,此时火焰可以自由发展,燃烧反应会快速进行,但垂直方向存在限制,火焰发展过程中其上下边缘会逐渐受壁面影响,导致上下发展速度相较于气流方向的速度更低;当火焰发展到边界接触壁面时,则会进入“火焰碰壁发展阶段 (wall-touching)”,此时火焰发展不再是自由发展,而是会受到壁面限制,由于氨气火焰受到浮力影响,通常上边缘先接触壁面;在火焰发展超出视窗后,最终会进入“火焰流出阶段 (outflow)”,此时靠近燃烧室出口一侧的火焰会被下游通入的氮气迅速稀释并熄灭,此时为火焰前端速度观测阶段的最晚时刻.

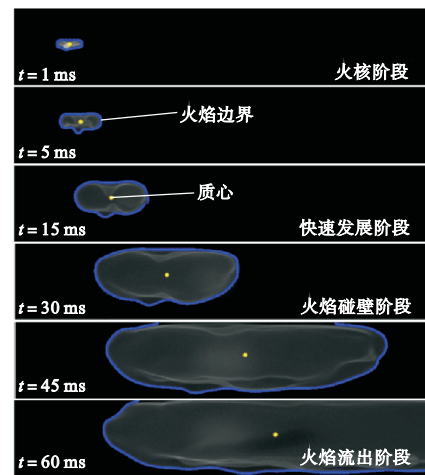


图 4 $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ 火焰发展图像 ($\phi = 0.8, \alpha = 5\%$)

Fig.4 Development image of $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ flame ($\phi = 0.8, \alpha = 5\%$)

3.2 火焰中 CH^* 变化

图 5 是当量比为 0.9, 掺混比为 15% 时火焰中的 CH^* 的变化过程, CH^* 可以表征燃烧的反应区,而从图中可以看到其主要分布在火焰的边界以及激光点火所形成的三瓣火核的连接处,根据前述,第三瓣火核的形成是由于气流卷吸,而卷吸导致的气流运动使三瓣火焰的连接处气体运动加快,燃烧及放热反应加剧,所以此处的 CH^* 强度也较高,由于中心部分的气流是强制运动,所以在火核初期,三瓣火焰连接处 (图中虚线内) 的 CH^* 强度较火焰边界更高,但随着火核逐渐转变为自维持火焰,内部气流卷吸作用减弱,两侧已燃气向中心运动, CH^* 强度较高区域逐渐向火焰边界转移,第三瓣火焰也由于壁面限制而逐渐消失.

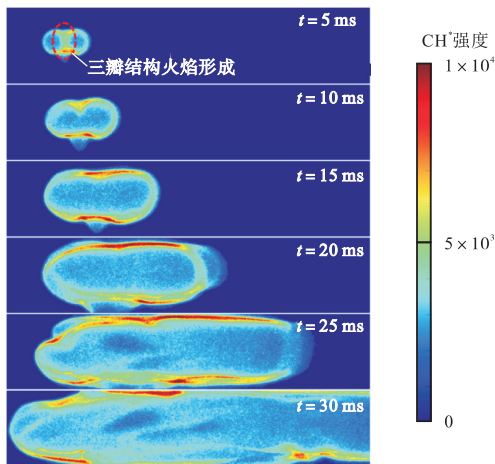
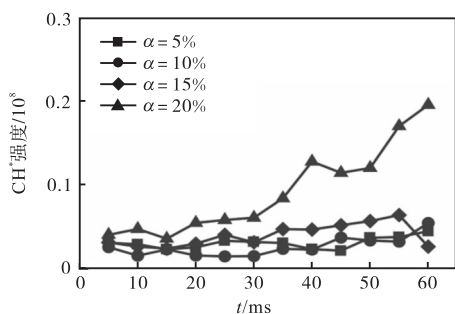
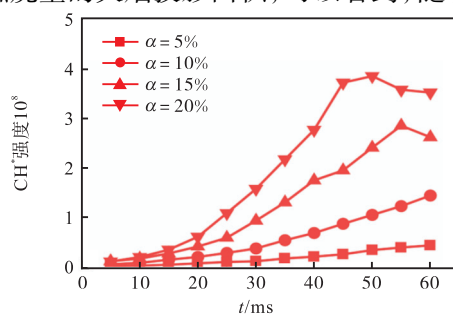


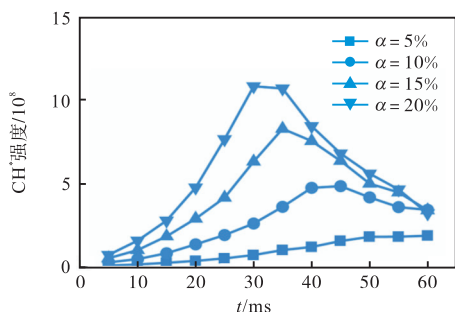
图5 火焰中 CH* 强度分布变化 ($\phi = 0.9, \alpha = 15\%$)
Fig.5 Changes in the distribution of CH* intensity in flames ($\phi = 0.9, \alpha = 15\%$)



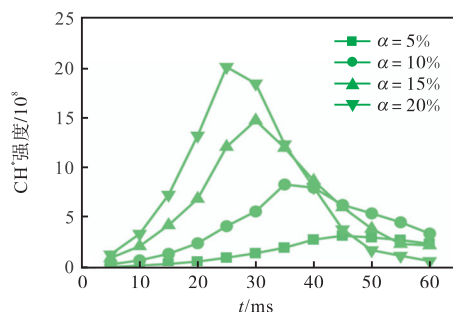
(a) $\phi = 0.6$



(b) $\phi = 0.7$



(c) $\phi = 0.8$



(d) $\phi = 0.9$

图6 不同工况下的火焰 CH* 强度

Fig.6 Flame CH* intensity under different conditions

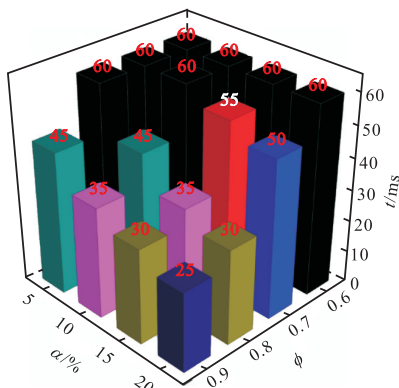


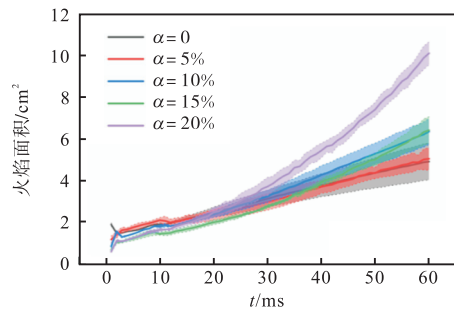
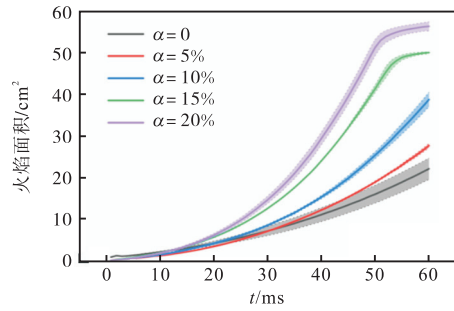
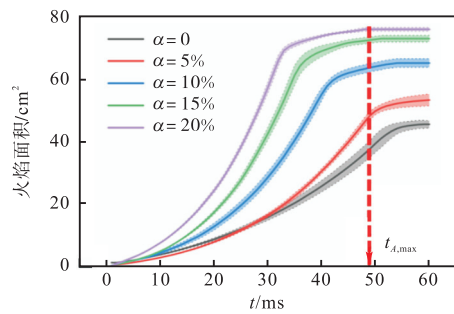
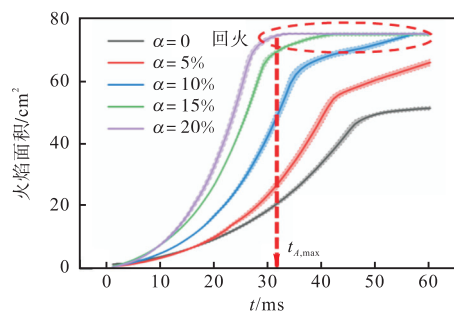
图7 混合气火焰的 CH* 峰值时间
Fig.7 Peak time of CH* in mixed gas flame

通过将 16 个含丙烷的工况 CH* 分布统计成图 6 可以对比出结果. 可以看到, 在低当量比下, 增加掺混比时, CH* 强度变化并不明显, 因为此时混合气稀薄, 反应速率较慢, 而随着当量比的提高, 丙烷的含量也迅速增加, CH* 强度会迅速增加, 与此同时, CH* 峰值出现的时刻会随当量比和掺混比的增加而逐渐提前, 因此丙烷的加入能极大强化氨气的燃烧反应. 从图 7 的 CH* 峰值时间可以看到, 改变当量比相较于改变掺混比对峰值时间的影响更大, 也即当量比提升对于燃烧过程的促进作用更强.

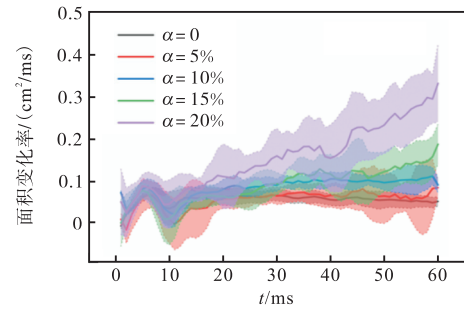
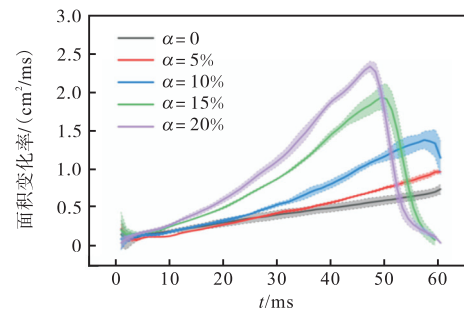
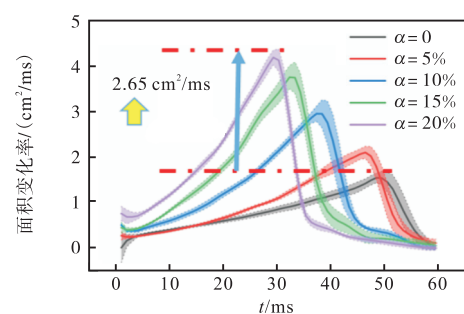
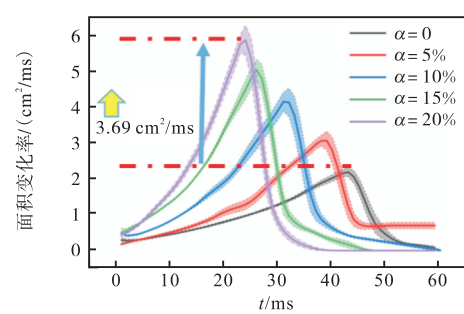
3.3 火焰面积及变化率

图 8 和图 9 分别为当量比为 0.6 ~ 0.9 时, 不同掺混比的火焰面积和面积变化率随时间的变化结果, 阴影部分为误差带, 后续同理. 这里定义火焰面积为正对燃烧室的火焰投影面积, 可以看到, 随着掺混比增

大, 燃烧反应也会增强, 火焰面积出现明显增加, 当量比更高时, 火焰面积出现峰值的时间 t_{Amax} 也会更早, 但若继续增加当量比, 会导致混合气发生剧烈燃烧, 出现“回火”现象. 本实验定义当火焰朝向来流气方向发展并超出视窗范围时 ($A_{flame} > 80 \text{ cm}^2$), 即为发生“回火”, 激光点火的焦点位于距离燃烧室入口 2 cm 处, 回火时火焰已完全覆盖燃烧室, 且会继续朝来流气方向发展, 如图 8 中当量比为 0.9 的高掺混比工况, 当火焰发展到 30 ms 时已发生“回火”, 此时火焰可能会沿着进气管道燃烧, 视为危险工况, 应是实际过程需要避免的.

(a) $\phi=0.6$ (b) $\phi=0.7$ (c) $\phi=0.8$ (d) $\phi=0.9$ 图8 不同工况的火焰面积
Fig.8 Flame area under different conditions

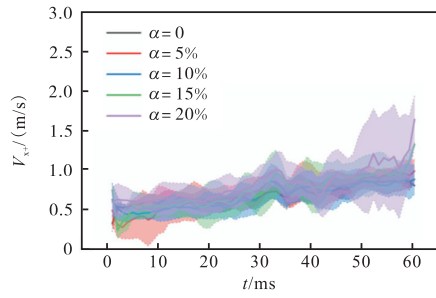
将上述结果进行处理可得到面积变化率,可以看出随掺混比增大,火焰增长速度加快,在高当量比下,提高丙烷掺混比对加快火焰发展的作用更明显,如图9中当量比为0.8和0.9两种工况,掺混比从0提高到20%时,面积增加率分别为 $2.65 \text{ cm}^2/\text{ms}$ 和 $3.69 \text{ cm}^2/\text{ms}$,同时可以看到,在低当量比下,面积和面积变化率的误差较大,说明此时火焰发展极不规

(a) $\phi=0.6$ (b) $\phi=0.7$ (c) $\phi=0.8$ (d) $\phi=0.9$ 图9 不同工况的火焰面积变化率
Fig.9 Rate of change of flame area under different conditions

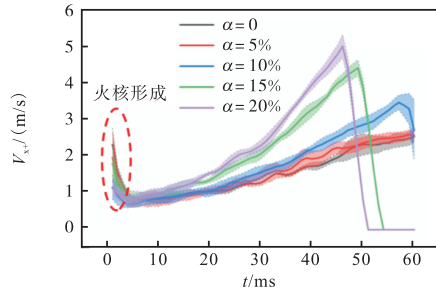
律,抖动严重,伴有熄灭的风险。

3.4 火焰发展速度

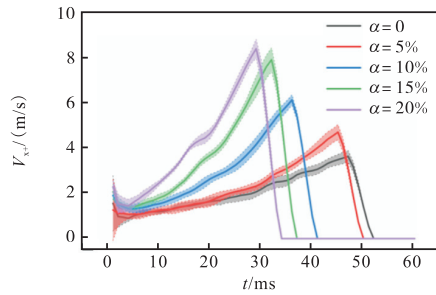
图10和图11分别为不同工况下的火焰不同方向发展速度随时间的变化结果,图10是与气流方向相同的火焰前端速度,定义为 V_{x+} ,从图中的结果可以看到,提高当量比,能显著加快火焰速度,同时也会增加燃烧稳定性,而固定当量比,提高掺混比时,



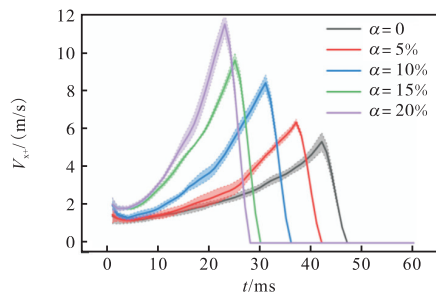
(a) $\phi = 0.6$



(b) $\phi = 0.7$



(c) $\phi = 0.8$

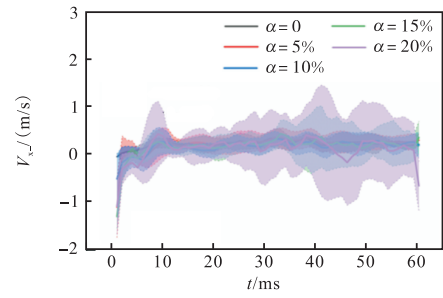


(d) $\phi = 0.9$

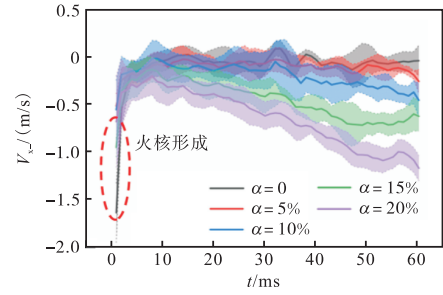
图 10 不同工况下火焰前端发展速度 (V_{x+})

Fig.10 Flame front velocity under different conditions

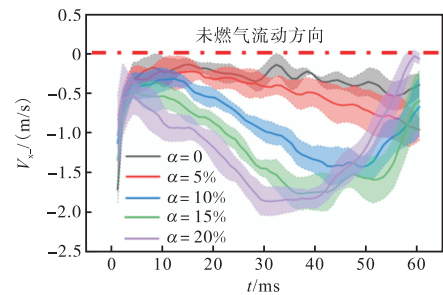
火焰速度也会更快达到峰值,随后会迅速降低到 0,根据前述,此时火焰流出了燃烧室,前端速度已无法继续计算;同时可以看到,在火核形成的初期,火焰发展速度会出现较高的值,随后速度会快速下降,这是因为击穿形成火核时,可以认为火焰发展不受流场影响,同时火核会随激波快速膨胀,而当火核向火焰转变后,由于流场干扰和火焰拉伸,速度会迅速降



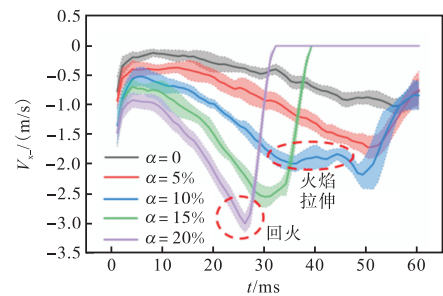
(a) $\phi = 0.6$



(b) $\phi = 0.7$



(c) $\phi = 0.8$



(d) $\phi = 0.9$

图 11 不同工况下火焰后端发展速度 (V_{x-})

Fig.11 Flame rear end velocity under different conditions

低,随后进入快速发展阶段,速度逐渐增加.

图 11 是朝来流气方向发展的火焰后端速度,记为 V_{x-} ,由于定义速度正方向为气流方向,所以 V_{x-} 小于 0 即为火焰朝来流一侧发展,可以看出,当量比较高时,火焰能抵抗来流阻力的影响,此时图中表现为 V_{x-} 小于 0,而当火焰前端流出燃烧室时,由于密度的突然改变,火焰后端会受到拉伸,此时火焰速度会

出现一段较平稳的波动,与图 11 类似,在火核发展初期速度会出现高值,当 V_x 瞬间降低到 0 时,与前端速度 V_{x+} 类似,此时火焰后端已超出燃烧室视窗(朝进气方向发展),火焰面积大于视窗面积(此时火焰前端也已超出视窗),即发生“回火”,同时可以看出,火焰后端的速度相对前端来说,循环变动和误差也更大,因为火焰后端会受来流气的阻力影响,火焰锋面发展更不规则。

由以上结果可以看出,较浓和掺混比较高的混合气更容易发生回火,掺混比的影响更为明显,因此在实际应用中,应避免氨气中的活性掺混气比例过高,例如本文中的丙烷或常见的氢气等,若运行时发生回火,则会造成严重的火焰振荡与噪声,严重时会影响机械稳定运行,甚至降低预期寿命。当氨气的当量比接近稀燃极限时,混合气又会出现火焰抖动,有熄灭的风险,同时为了降低最小点火能量以及增加可燃性,则需要适当增加掺混气的含量,以提高混合气在极限时的可燃性。在本文中,当丙烷含量超过 15% 时,从图 10 和图 11 可知,已出现了明显的回火,结合最小点火能量的结果可知,过高的掺混比使点火能量下降的收益也会减小,因此基于本研究平台的实验条件,建议氨/丙烷混合气的丙烷掺混比不超过 15%,同时可适当增加在氨气稀燃极限时的掺混比,但不宜过高。

4 结 论

本文基于流动条件下的激光点火平台,对处于不同条件下的 $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ /空气混合气进行了激光点火实验,将流动状态下的混合气火焰发展分为不同阶段,研究了最小点火能量、火焰中的 CH^* 强度及分布、火焰发展面积和发展速度随不同工况的变化情况,其结果对于研究 $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8$ 燃料在实际应用中的点火及燃烧过程有一定的参考价值,主要结论如下:

(1) 当量比对最小点火能量的影响为非线性,整体呈现“U”型,最小点火能量的最小值随掺混比提高而逐渐向较浓一侧移动,提高掺混比能减小最小点火能量,但其影响会逐渐减小。

(2) 火焰中 CH^* 能表征燃烧反应区,其主要分布在火焰边界及“三瓣”火焰连接处等燃烧反应较强区域,火核初期由于气流卷吸导致“三瓣”火焰连接处的 CH^* 强度较边界更高,提高当量比能显著提高 CH^* 强度;而改变当量比相较掺混比对 CH^* 峰值出现的时间影响更大。

(3) 火焰面积及变化率随当量比及掺混比提高而

增大,在高当量比下火焰易出现“回火”的危险情况,可能导致火焰沿进气管道燃烧,而在低当量比下火焰抖动严重,循环变动更大,容易出现熄灭的风险。

(4) 随着当量比和掺混比的提高,火焰前端速度 V_{x+} 会明显增加;而火焰后端速度 V_x 由于受来流气阻力和前端火焰流出拉伸的影响,误差波动更剧烈,且后端火焰锋面发展更不规则。

参考文献:

- [1] Eric M, James M, Jon M. Wind-powered ammonia fuel production for remote islands: A case study[J]. *Renewable Energy*, 2014, 72: 51-61.
- [2] Yusuf B, Ibrahim D, Calin Z, et al. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1379-1395.
- [3] Reiter A J, Kong S C. Demonstration of compression-ignition engine combustion using ammonia in reducing greenhouse gas emissions[J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(5): 2963-2971.
- [4] Li Jinguang, Zhang Ren, Pan Jiaying. Ammonia and hydrogen blending effects on combustion stabilities in optical SI engines[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 280: 116827.
- [5] Lhuillier C, Brequigny P, Contino F, et al. Experimental study on ammonia/hydrogen/air combustion in spark ignition engine conditions[J]. *Fuel*, 2020, 269: 117448.
- [6] Phuoc T X. Laser-induced spark ignition fundamental and applications[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-397.
- [7] Liou L C, Culley D E. Laser ignition application in a space experiment[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1993, 1862: 71-82.
- [8] Manfletti C. Laser ignition of an experimental cryogenic reaction and control thruster: Ignition energies[J]. *Journal of Propulsion & Power*, 2014, 30(4): 952-961.
- [9] Nakaya S, Iseki S, Gu X, et al. Flame kernel formation behaviors in close dual-point laser breakdown spark ignition for lean methane/air mixtures[J]. *Proceedings of*

- the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3441-3449.
- [10] An Bin, Wang Zhenguo, Yang Leichao, et al. The ignition characteristics of the close dual-point laser ignition in a cavity based scramjet combustor[J]. *Experimental Thermal & Fluid Science*, 2019, 101: 136-140.
- [11] Lin Bingxuan, Wu Yun, Zhang Zhibo, et al. Ignition enhancement of lean propane/air mixture by multi-channel discharge plasma under low pressure[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 148(5), 1171-1182.
- [12] Wu Yong, Gu Mingyan, Li Shuanglong, et al. Study on the NO_x formation of propane/ammonia co-combustion with a swirl burner[J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2024, 17: 100242.
- [13] Wang Zhe, Ji Changwei, Wang Du, et al. Experimental and numerical study on laminar burning velocity and premixed combustion characteristics of $\text{NH}_3/\text{C}_3\text{H}_8/\text{air}$ mixtures [J]. *Fuel*, 2023, 31: 125936.
- [14] Galia F, Omer K, Joseph K L. Plasma reforming for enhanced ammonia-air ignition: A numerical study[J]. *Fuel Communications*, 2022, 12: 100070.
- [15] Moffett S P, Bhandari S G, Shepherd J E, et al. Investigation of statistical nature of spark ignition[C]//2007 Fall Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute. Livermore, California, Sandia National Laboratories, 2007: 123-130.
- [16] Lee T W, Jain V, Kozola S. Measurements of minimum ignition energy by using laser sparks for hydrocarbon fuels in air: Propane, dodecane, and Jet-A fuel[J]. *Combustion and Flame*, 2001, 125(4): 1320-1328.
- [17] Beduneau J L, Kim B, Zimme L, et al. Measurements of minimum ignition energy in premixed laminar methane/air flow by using laser induced spark[J]. *Combustion and Flame*, 2003, 132(4): 653-665.
- [18] Dumitrache C, Yalin A P. Gas dynamics and vorticity generation in laser-induced breakdown of air[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5835-5850.