

氨氢燃料激光点火特性实验和模型研究

张俊杰, 胡二江*, 江鑫, 刘昀洋, 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)

Experimental and Model Study on Laser Ignition Characteristics of Ammonia-Hydrogen Fuel

ZHANG Junjie, HU Erjiang*, JIANG Xin, LIU Yunyang, HUANG Zuohua

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

Abstract: Based on the constant volume combustion chamber, laser ignition experiments were carried out on ammonia-hydrogen mixture with different hydrogen mixing ratio (0~20%), different equivalence ratio (0.6~1.4) and different initial pressure (0.1~0.4MPa). The flame development morphology, probability of ignition and minimum ignition energy changes under different conditions were analyzed. At the same time, a minimum ignition energy optimization model is proposed which can directly predict the energy under different working conditions. The results show that increasing the hydrogen ratio and initial pressure can significantly improve the flame stability and reduce the minimum ignition energy. The reduction effect is most obvious when the hydrogen ratio is 10% or the initial pressure is 0.2MPa, but the reduction range will gradually decrease with increasing the hydrogen ratio or pressure. The effect of equivalence ratio on flame stability and minimum ignition energy is non-monotonic. When equivalence ratio is 0.8, the minimum ignition energy reaches the minimum value. The optimized model can predict the minimum ignition energy well under all working conditions, but the accuracy of the prediction results is still affected by the function properties.

摘要: 基于定容燃烧平台, 对不同掺氢比(0~20%)、不同当量比(0.6~1.4)及不同初始压力(0.1~0.4MPa)的氨氢混合气进行了激光点火实验, 对不同条件下的火焰发展状态、点火成功率及最小点火能量的变化进行了分析, 同时提出了能直接预测不同工况混合气的最小点火能量优化模型。结果表明: 提高掺氢比和初始压力均能明显提高火焰稳定性及降低最小点火能量, 在掺氢比为 10%或初始压力为 0.2MPa 时, 降低效果最明显, 但继续提高掺氢比或压力, 降低幅度会逐渐减小; 当量比对火焰稳定性和最小点火能量的影响均呈现非单调变化, 当量比为 0.8 时, 最小点火能量达到最小值; 优化后的模型在各工况下, 均能较好地预测最小点火能量, 但其预测结果的精确性仍然受函数性质的影响。

关键词: 激光点火; 氨氢燃料; 最小点火能量; 点火概率模型; 定容燃烧弹

Key words: laser ignition; ammonia-hydrogen fuel; minimum ignition energy; ignition probability model; constant volume combustion chamber

中图分类号: V233.3; TK401

文献标识码: A

0 概述

为了应对碳排放带来的全球气候影响以及体现大国在环境保护问题上的责任, 2020 年中国提出“双

碳”目标, 这无疑对当前已有的降低碳排放的技术提出了新的考验, 尤其对于发动机行业来说, 如何更高效更经济地减少碳排放已经成为了当前众多研究

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家自然科学基金 (52176131)

作者简介: 张俊杰 (1998-), 男, 博士生, 主要研究方向为高能点火及光学诊断, E-mail: zhangjunjie0421@stu.xjtu.edu.cn;

胡二江 (联系人 1983-), 男, 教授, 博士, 主要从事航空发动机点火和燃烧调控研究, Email: hujiang@mail.xjtu.edu.cn.

者关注的目标，而其中减少含碳燃料的使用是一条重要的途径。

近年来各类低碳和无碳燃料已经越来越受到研究者的关注，氨气作为一种“无碳高氢”的燃料，在燃烧后可以实现零碳排放，且氨气的运输成本较低，能量密度较高，在锅炉和燃机中可直接用于燃烧，是一种优秀的发动机燃料^{[1]-[3]}。此外氨气还可以广泛应用于电子、化工、食品、炸药等行业，合成氨技术的发展已经让氨气成为了一种价格低廉、产量巨大的化工品，因此氨气作为发动机燃料具有广阔的应用前景^{[4],[5]}。

在实际应用中氨气作为燃料燃烧还存在一些问题，氨气的可燃性较低，可燃范围窄，此外氨气的燃烧速度较低，这会使得在某些极端的工况下，氨气燃烧的火焰稳定性较差，易出现抖动或熄灭等问题，而且氨气在燃烧时可能会伴有较高的NO_x排放，这些问题都使氨气在作为燃料的应用上受到限制。目前比较有效可行的应用途径是在氨气中掺混如氢气、甲烷等燃烧性能更佳的燃料辅助燃烧，这可以有效地提高其可燃性以及火焰稳定性，而氢气作为另一种无碳燃料则是理想的选择。

由于氨气的低可燃性，这使得传统的火花点火方式在氨气燃料的点火问题上显得乏力，除了掺混可燃性较高的燃料外，使用其他的高能点火方式也有助于混合气的成功点火及燃烧。为了实现高效、稳定、可靠地点火，可以使用一种新型的点火方式：激光诱导等离子体点火(Laser Induced Plasma Ignition, LIPI)。LIPI通过诱导击穿产生大量高温等离子体完成点火过程，不存在与目标分子吸收波长匹配等问题^{[6],[7]}，同时LIPI发射的电磁波可以忽略不计，最大限度地降低了电磁干扰的风险^[8]，LIPI还可以更好地控制点火时间和位置，有利于多点点火的应用^{[9],[10]}。此外，氨气在稀薄条件下会更难以点火成功，所以LIPI比电火花点火更适应于氨气这类低可燃性燃料的点火使用。

目前已有许多研究学者对氨气和氨氢混合燃料在发动机上的应用进行了广泛的研究，其中多数是氨氢燃料燃烧特性。Lin等人^[11]使用数值模拟的方法研究了在直喷发动机中，富氨条件下燃烧产生的氢气对加速燃烧的作用，结果表明，上止点前喷射模式产生强烈的氨分层导致富氨燃烧，然后导致富氨生产，最终增强氨燃烧并缩短燃烧持续时间。Wang等人^[12]对柴油点火氨氢混合燃料发动机双喷射策略进行了数值模拟分析研究，结果表明：在双喷油策略下，随着喷油正时延迟，发动机功率和经济性逐渐下降，且废气中的排放量逐渐增加，但在使用氨氢混合燃料后，发动机的氨和氢气逸出非常低，废气中的排放也很低。Li等人^[13]研究了氨氢混合气对光学SI发动机燃烧稳定性的影响，结果表明当氨氢能比小于10%时，氢气添加对氨火焰速度的影响变得更加明显，因为氢气大大提高了早期燃烧

的稳定性。Park等人^[14]研究了甲烷/氨/氢混合燃料在大型工业燃气轮机中的热力学性能，研究发现超过80%的空气污染份额是由使用氨排放的NO_x产生的，同时指出氢是降低排放的非常有效的燃料。

由此可见，目前的研究主要集中在氨氢燃料在发动机上的燃烧及排放结果，且多使用的是数值模拟的方法，对同样影响燃烧效果的点火过程研究不足，因此本文在定容燃烧弹上结合激光点火进行实验，对不同工况下的氨氢燃料火焰状态，最小点火能量，点火概率变化进行了分析，并提出了优化模型预测不同条件下混合燃料的最小点火能量。

1 实验装置及数据模型

1.1 实验装置

激光点火实验平台如图1所示，主要包括进气系统、光路系统、点火系统和数据采集系统等。本实验所使用的定容燃烧弹的腔体轴向和径向两端面各有两个石英玻璃视窗，此外，定容燃烧弹还装有压力变送器（罗斯蒙特3051TA），用于测量进气时的静压力，以及压电式压力传感器（Kistler 7001）用于测量燃烧过程中的压力。

激光点火系统采用Nd:YAG灯泵浦纳秒调Q激光器（Grace NASOR800），有355 nm/532 nm/1064 nm共3个波长可供选用，本文使用的是532 nm。激光脉冲能量是通过外部光路上的能量衰减器进行调节，激光脉冲能量的测量主要通过分光镜和两个能量计（Coherent）来实现。光路系统包括光源、凸透镜和高速摄像机（Phantom V2012），高速摄像机帧速为10000 fps。实验中使用各气体纯度均为99.999%。

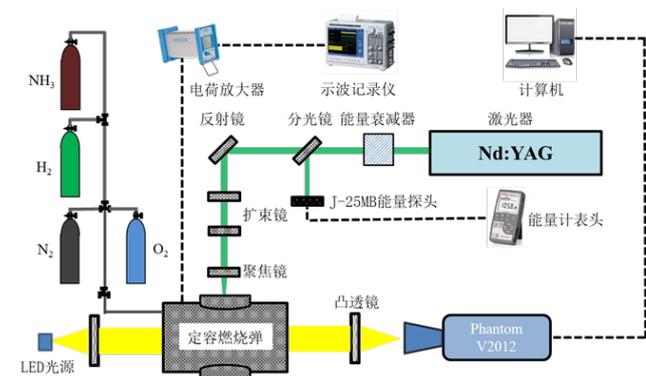


图1 激光点火实验系统图

1.2 实验工况

实验所用空气为N₂与O₂的混合气（体积比为3.762:1），燃烧室内的初始温度约为298 K，静态压力保持在约0.1MPa（室内环境条件），在进行点火

实验时, 每组工况均进行约 20 次以上点火以保证准确性, 表 1 为具体实验工况:

表 1 实验工况

初始压力 p/MPa	当量比 ϕ	掺氢比 $X_{\text{H}_2}/\%$
0.1~0.4	0.6~1.4	0~20

1.3 数据处理

本实验中, 将最小点火能量定义为点火成功率为 0.5 时, 对应的激光入射能量, 记为 MIE (Minimum Ignition Energy), 在改变激光入射能量时参考前一次点火结果, 如果上一次点火成功, 则下一次将降低入射能量; 否则将提高入射能量直至点火成功。由于混合气在未能点火成功时, 会因多次击穿而改变初始条件, 所以在同一次实验中, 最多尝试五次点火, 若全部失败, 则需更换容弹内的混合气进行下一次实验, 并继续提高点火能量, 重复以上过程。

对于单一变量的点火结果, 可以采用使用逻辑回归方法对点火结果进行统计^[15], 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, 具体函数关系式如式(1):

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

定义在点火能量 x 下的点火结果累计概率分布函数 $P(x)$:

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

对于 n 次试验的结果, 其点火能量 x 和点火能量 y 可以用似然函数来表示:

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

其中 $P(x)$ 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:

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

当概率为 0.5 时, 可得到固定工况下的最小点火能量 E :

$$E_{(P=0.5)} = \frac{-\beta_1}{\beta_0} \quad (5)$$

最后, 95% 置信区间的上置信限 (UCL) 和下置信限 (LCL) 可以使用双边区间的大样本方法计算, 图 2 是初始压力为 0.1 MPa, 当量比为 1.0, 掺氢比为 20% 时的点火成功率曲线。

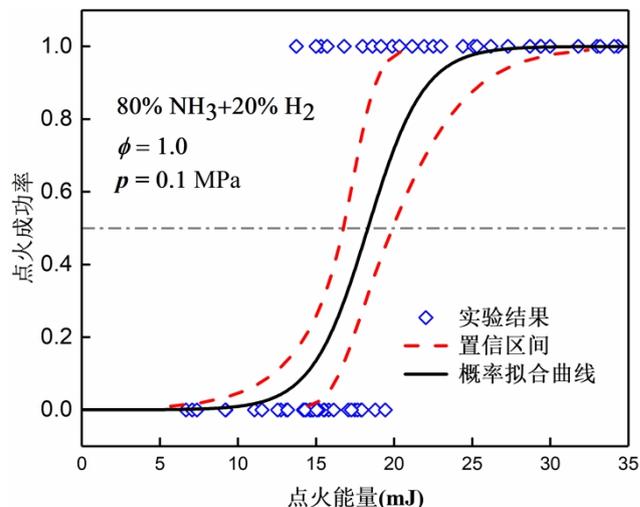


图 2 点火成功率处理结果示意图

这种数学模型对于点火这类伯努利分布的结果预测相对较好, 定义域内的敏感性分布较为合适, 和实际观察到的现象符合也较好。但上述的公式(4) 由于只含有一个变量 x (输入能量), 因此只能描述固定工况下的点火结果, 无法满足实际应用中的变化工况, 因此本文结合实验工况将原有的逻辑函数模型进行优化, 使其可适用于可变工况, 优化后的公式如下:

$$P(y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-\beta_0 f(E, Z) - \beta_1}} \quad (6)$$

其中 Z 为工况参数, E 为输入能量, 在本文中为压力、当量比或掺氢比, $f(E, Z)$ 为非单调函数且只有一个拐点, $f(E, Z)$ 的具体形式如下, 其中 a, b, c 为拟合参数:

$$f(E, Z) = E e^{az^2 + bz + c} \quad (7)$$

则由最小点火能量 MIE 的定义可得:

$$\text{MIE} = \delta(Z) = \frac{-\beta_1}{\beta_0 e^{az^2 + bz + c}} \quad (8)$$

由于参数 a, b, c, β_0 及 β_1 均可通过拟合过程获得, 故 MIE 为由工况参数 Z 确定的唯一结果, 即优化后的模型可通过工况参数直接预测混合气的 MIE。

2 混合气激光点火的火焰发展

激光点火的火焰不同于常规电火花点火的球型火焰, 而是呈现三瓣型, 原因在于激光入射后, 沿光路方向的混合气对光的能量吸收不同, 所以产生的温度场和压力场关于垂直光路的方向不对称, 而且由于温度场和压力场的梯度不重合, 会导致斜压转矩的出现 **Error! Reference source not found.**, 在发展过程中, 火核在激光入射一侧和出射一侧会形成强度不同的两对旋涡, 随着火核发展, 旋涡带动混

合气流动最终形成三瓣型火焰。

由于混合气的火焰发展较弱,第三瓣火焰会由于流动在早期很快消散,具体过程如图3所示,定义火核出现的时刻为零时刻,图4~6为部分工况火焰发展后期图片。图4为初始压力 $p = 0.1\text{MPa}$,掺氢比为20%,发展时刻为3ms时,不同当量比的火焰发展图片。可以看出当量比为1.0时火焰发展速度最快,当量比为0.8时,由于混合气浓度过低,所以不如当量比较高的工况火焰发展边界清晰。由于氨气燃烧速度较慢,所以火焰在发展过程中会出现上浮的现象,激光点火会形成上下两瓣火焰,所以在浮力作用下上半部分火焰会发展更快。因为当量比为1.0时的火焰发展最快,所以受浮力的影响最小,上下两瓣火焰的大小差异也最小。

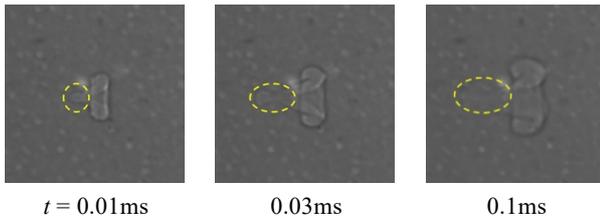


图3 第三瓣火焰消失示意图

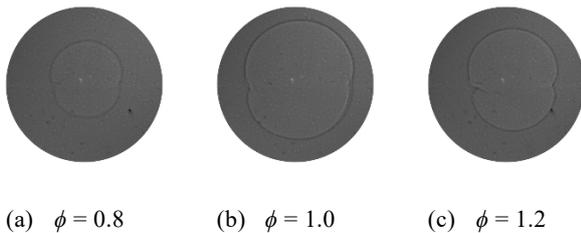


图4 不同当量比下的火焰发展图片($t = 3\text{ms}$)

图5为初始压力 $p = 0.1\text{MPa}$,当量比为1.0,发展时刻为3ms时,不同掺氢比的火焰发展图片。可以看到纯氨气的火焰发展极不稳定,上下两瓣火焰已不能维持其原有的形态,而且火焰边界非常不清晰。纯氨气由于火焰发展速度慢,火焰受浮力的影响最大,随着掺氢比的提高,火焰越发稳定,发展速度也越快,边界越清晰,且上下两部分火焰之间的差异也越小,所以氢气的掺混能极大改善氨气火焰的稳定性。

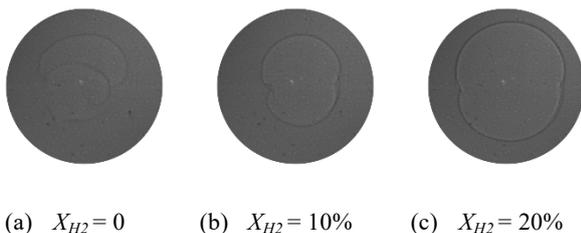


图5 不同掺氢比下的火焰发展图片($t = 3\text{ms}$)

图6是当量比为1.0,掺氢比为20%,发展时

刻为3ms时,不同初始压力的火焰发展图片。从图中可以看出,初始压力的提高会减小火焰发展速度(但也能降低MIE,后文详述),并且因为混合气初始的量增加,火焰边界的亮度会有所加强。由于压力增加会导致氢气和氨气的量同时增加,但氨气在混合气中的占比更大,所以受浮力的影响也会加大,而且火焰发展到后期会出现多瓣火焰层叠的趋势,推测是由于压力提高导致初始火核出现了多瓣火焰。

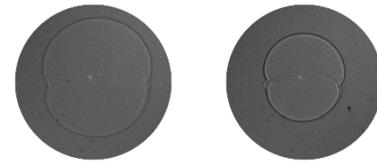


图6 不同初始压力下的火焰发展图片($t = 3\text{ms}$)

图6 不同初始压力下的火焰发展图片($t = 3\text{ms}$)

从火焰发展图片可以看出,氢气的掺混能有效地加强氨气火焰的稳定性,火焰边界能一直稳定到发展后期。火焰的发展速度越快,则火焰受浮力的影响也越小,所以对于掺氢比更高、初始压力更低的混合气和当量比为1.0的混合气,其上下两部分火焰的形态相差也越小。

3 最小点火能量及优化模型

最小点火能量(MIE)是衡量某种燃料在特定工况下的点火难易程度的指标,对于最小点火能量的定义有多种形式,由公式(5)得到的MIE是点火成功率为0.5时对应的能量,由于公式中的参数 β_0 及 β_1 是由点火结果进行拟合的到的,对于不同的工况,拟合结果会随之改变,所以对于每种工况都需要单独确定 β_0 及 β_1 ,且实际燃烧过程中工况通常会发生变化,这都导致所得到的MIE在实际情况中的适用范围受到限制。

为了得到MIE随工况变化的关系,本文优化了原有的公式(4),得到了新的多参数输入的拟合公式(6),新的公式具有以下特点:(1)仍然是二元输出,服从伯努利分布;(2)全输入领域内的敏感度不一致,在极大输入和极小输入附近敏感度仍然很小;(3)逻辑函数设定包含了多个自变量,且可继续拓展;(4)针对不同的给定初始条件,其概率估计也仍然满足继续采用似然函数的条件。以下为不同工况对MIE的影响及拟合结果:

3.1 不同掺氢比的影响

图7是初始压力为0.1MPa,不同当量比下,掺氢比从0~20%变化的混合气的点火成功率与点火能量的变化关系,图中彩色瀑布图为优化后的模型(公式4)成功率拟合结果,黑色实线为初始模型(公式6)的拟合结果,红色实线即为MIE,后续图同理。

图8为上述工况的MIE结果及使用优化后的公式所得到的拟合结果。从图中的结果可知,不同当量比的混合气的MIE都随掺氢比的增加而逐渐降低,当掺氢比从0增加到5%时,MIE降低幅度最大,可达55%以上,掺氢比继续增加到10%时,MIE降低的幅度逐渐减小到约30~40%,若继续增加掺氢比到15%甚至更高,MIE的降低幅度会进一步下降至30%以下,虽然继续提高掺氢比会持续降低MIE,但考虑到氢气占比过高会导致混合气温度上升,从而导致排气中的污染物增多,所以氢气的占比不宜过高^[16]。从图中也可以看出,拟合模型与实验值的符合程度较好,当掺氢比逐渐增加时,拟合效果也逐渐提高,这是因为掺氢比提高能增强混合气的可燃性,实验数据的结果稳定性也会随之增加。

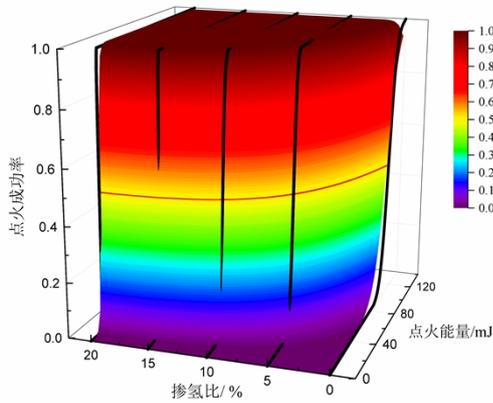
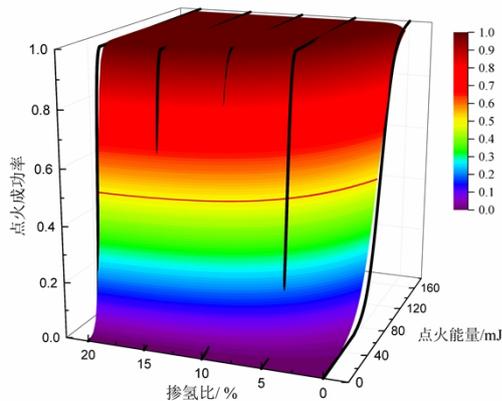
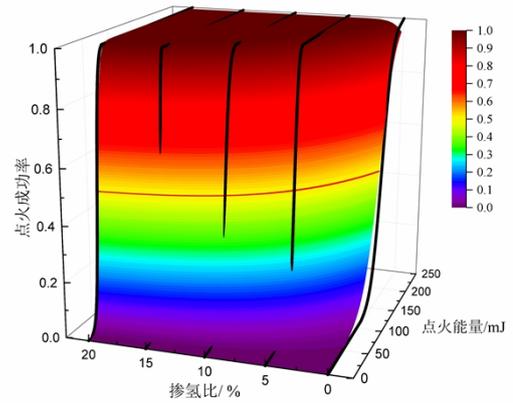
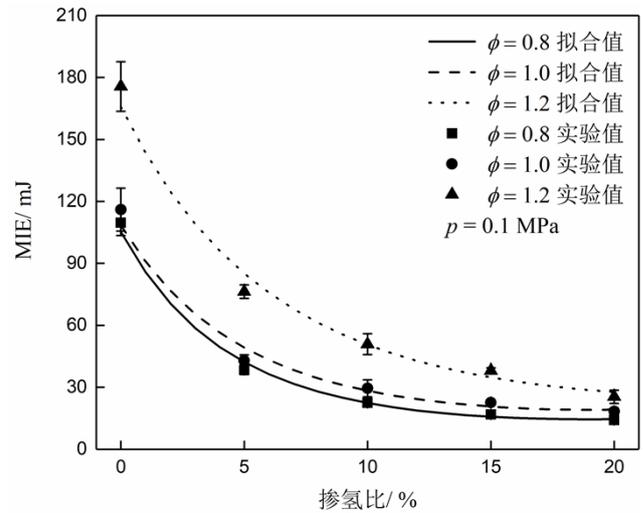
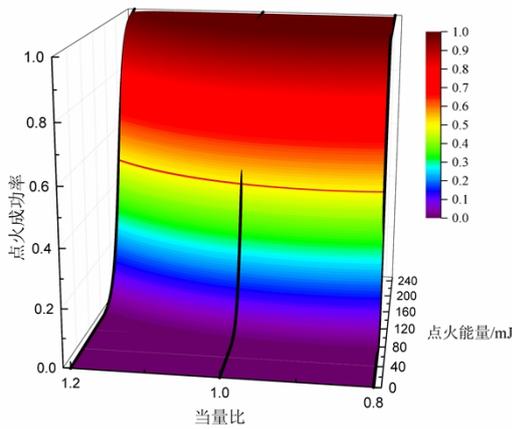
(a) $\phi=0.8$ (b) $\phi=1.0$ (c) $\phi=1.2$ 图7 不同掺氢比的点火成功率拟合($p=0.1\text{MPa}$)图8 不同掺氢比的最小点火能量($p=0.1\text{MPa}$)

图9是初始压力为0.1MPa,不同掺氢比条件下,当量比从0.6~1.4变化的混合气的点火成功率与点火能量的变化关系,其中当量比为0.6和1.4的工况已经接近掺氢比为0的纯氢气的燃烧极限,实验误差较大,故未计入结果。图10为上述工况的MIE结果及使用优化后的公式所得到的拟合结果。

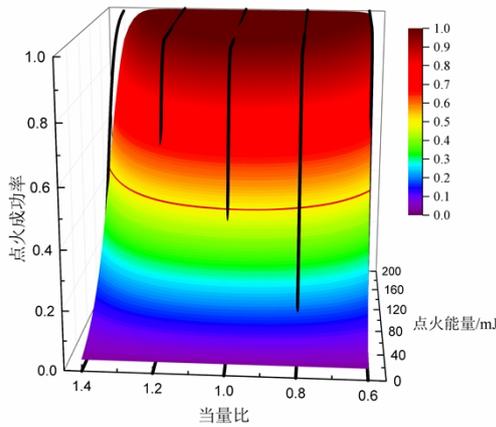
从图10可以看出氢气当量比从0.6到1.4变化时,MIE随当量比增加会先下降再上升,在当量比为0.8时达到最低,这也与之前的研究者结论一致^[17],整体呈现出“U”型^[18]。因为当量比对点火的影响主要体现在分子数密度上,激光点火的机制在于瞬间产生的高密度光斑使混合气分子发生电子雪崩,形成大量等离子体,电子雪崩的产生是由于各粒子的不断碰撞并交换能量。因此当量比较低时,各粒子间碰撞的频率减小,要形成电子雪崩则需要加大入射能量,为初始的带电粒子提供更多的能量;而当量比较高时,虽然粒子数密度增加,但由于混合气加浓,为了维持火焰发展则需要更多的自由基,因此也需要提供更大的入射能量^[19]。所以当量比对

于 MIE 的影响是分子间碰撞几率和火焰发展所需自由基浓度的综合结果。

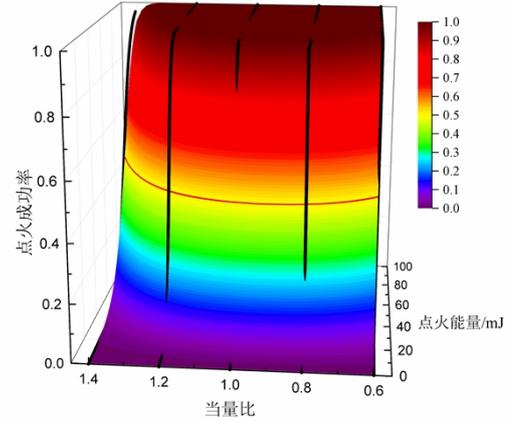
从拟合的结果来看,整体的拟合度都较高,由于模型函数本身的性质,迭代结果易受到拐点处的影响。对于不同当量比变化,MIE 有拐点的非单调变化情况,拐点处的变化速率会对拟合结果产生较大影响,如图中 0.8 当量比下,10%掺氢比的工况,而当拐点处 MIE 变化速率较小时,拟合程度也会随之提高,如 20%掺氢比工况,所以虽然现有的模型拟合公式能在一定程度上较好地预测不同工况的 MIE 变化情况,但对于 MIE 会出现拐点的工况,函数本身性质对预测结果的影响仍然是不可忽略的。



(a) $X_{H_2}=0$



(b) $X_{H_2}=10\%$



(c) $X_{H_2}=20\%$

图 9 不同当量比的点火成功率拟合($p=0.1\text{MPa}$)

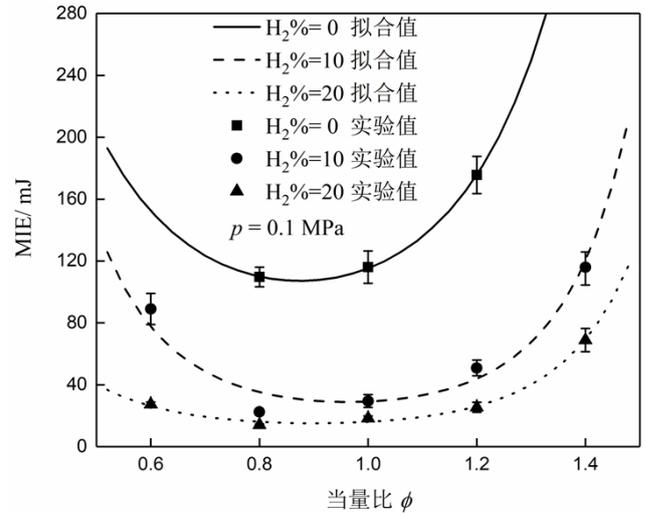


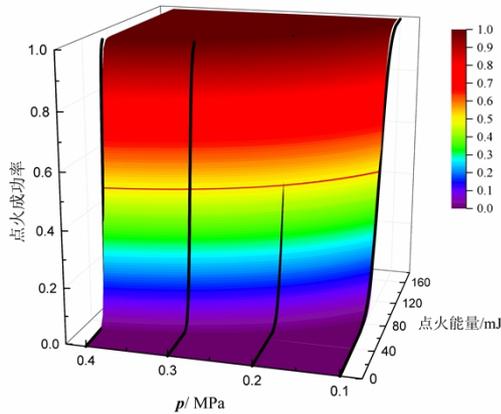
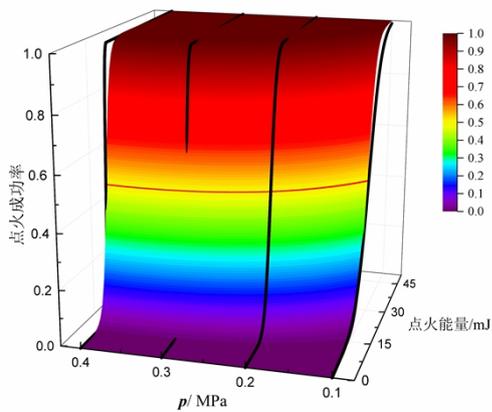
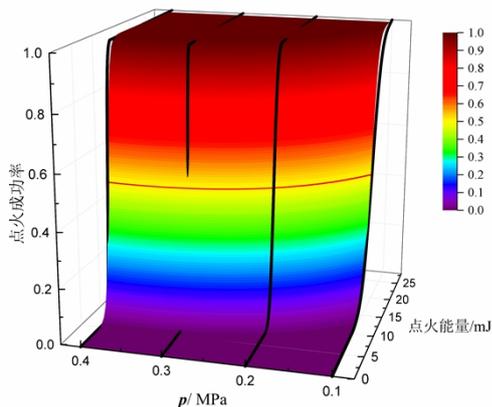
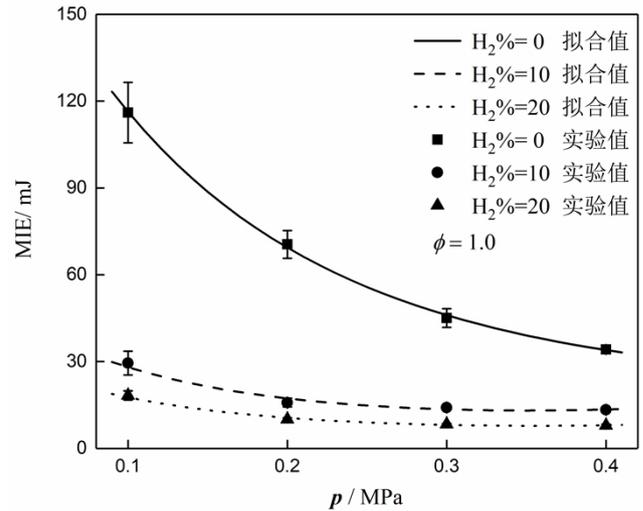
图 10 不同当量比的最小点火能量($p=0.1\text{MPa}$)

图 11 是当量比为 1.0,不同掺氢比条件下,初始压力从 0.1~0.4MPa 变化的混合气的点火成功率与点火能量的变化关系。图 12 为上述工况的 MIE 结果及使用优化后的公式所得到的拟合结果,可以看出优化模型与实验数据的吻合程度较高。

从图 12 中可知,增加初始压力可以降低混合气的 MIE,初始压力与掺氢比的影响类似,随着压力的不断增加,MIE 的降低幅度会逐渐减小,这是因为在点火阶段,燃料的消耗速率正比于初始压力,当压力升高时,燃料消耗加快,此时火核内的预混合气的温度升高速率也会增大,所以在更高的初始压力下,火核能更快达到由高温热核向自维持火焰转变的温度,继而引发火核周围的混合气,形成稳定的火焰传播过程。

对于混合气的点火过程能否成功,其主要因素有两个^[20]:一是混合气被击穿时,能否快速启动化学反应形成高温的热火核;二是火核在向自维持火焰转变的过程中,释放的热量是否会被周围较冷的

混合气散失。因此点火能量和火核阶段的化学反应温升速率都是影响点火成功率的关键，所以提高初始压力和掺氢比以及选择合适的当量比都可以降低混合气的最小点火能量。

(a) $X_{H_2}=0$ (b) $X_{H_2}=10\%$ (c) $X_{H_2}=20\%$ 图 11 不同初始压力的点火成功率拟合($\phi=1.0$)图 12 不同初始压力的最小点火能量($\phi=1.0$)

4 结论

(1) 提高掺氢比和初始压力都能有效增加氨氢混合气火焰的稳定性且能减轻浮力对火焰形态的影响，当量比为 1.0 时混合气的火焰发展最快。

(2) 掺氢比和初始压力的增加都能降低混合气的最小点火能量，掺氢比增加到 10% 或压力提高到 0.2 MPa 时，MIE 降低效果最明显，继续增加则 MIE 降低幅度逐渐减小。

(3) 最小点火能量随当量比增加会先减小再增大，当量比对 MIE 的影响呈“U”型，在各实验工况中，当量比均为 0.8 时，MIE 达到最小值。

(4) 基于已有的逻辑回归函数，提出的优化后的多参数输入模型，能较好地预测各种工况的 MIE，对于非单调的变化趋势，预测结果的精度仍受函数本身性质的影响。

参考文献:

- [1] CHAI Waisong, BAO Yulei, JIN Pengfei, et al. A Review on Ammonia, Ammonia-Hydrogen and Ammonia-Methane Fuels[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 147.
- [2] Naha B, Vm A, Asaa B. Ammonia-Hydrogen Combustion in A Swirl Burner with Reduction of NOx Emissions[J]. Energy Procedia, 2019, 158:2305-2310.
- [3] Gotama G J, Hayakawa A, Okafor E C, et al. Measurement of The Laminar Burning Velocity and Kinetics Study of The Importance of The Hydrogen Recovery Mechanism of Ammonia/Hydrogen/Air Premixed Flames[J]. Combustion and Flame, 2022, 236.
- [4] WANG Yang, ZHOU Xiaohu, LIU Long. Study on The

- Mechanism of The Ignition Process of Ammonia/Hydrogen Mixture Under High-Pressure Direct-Injection Engine Conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(78): 38871-38886.
- [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.
- [6] Phuoc T X. Laser-induced Spark Ignition Fundamental and Applications [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, 44(5): 351-97.
- [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 Zhelong, LIU Shang, LIU Wei, et al. Numerical Investigation of Ammonia-Rich Combustion Produces Hydrogen to Accelerate Ammonia Combustion in A Direct Injection SI Engine [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023.
- [12] WANG Hechun, WANG Binbin, YANG Chunlei, et al. Study on Dual Injection Strategy of Diesel Ignition Ammonia/Hydrogen Mixture Fuel Engine [J]. *Fuel*, 2023, 348.
- [13] LI Jinguang, ZHANG Ren PAN Jiaying, et al. Ammonia and Hydrogen Blending Effects on Combustion Stabilities in Optical SI Engines [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 280.
- [14] Park Y, Choi M, Choi G, Thermodynamic Performance Study of Large-Scale Industrial Gas Turbine with Methane/Ammonia/ Hydrogen Blended Fuels [J]. *Energy*, 2023.
- [15] Moffett S P, Bhanderi 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, Sandia National Laboratories, Livermore, California, 2007.
- [16] Omar I A, ZHOU Bo, Karim H, et al. Characteristics of NH_3/H_2 Blend As Carbon-Free Fuels: A Review[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022.
- [17] Herry L, ZHU Mingming, ZHANG Zhezi, et al. An Experimental Investigation into The Effect of Spark Gap and Duration on Minimum Ignition Energy of Partially Dissociated NH_3 In Air[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 241.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 张驰,钟北京,郑东.正庚烷/空气混合气最小点火能量及其影响因素[J]. *航空动力学报*, 2018, 33(02): 456-462.
- ZHANG Chi, ZHONG Beijing, ZHENG Dong. Minimum ignition energy of n-heptane/air mixtures and its affecting factors[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2018, 33(2): 456-462.