

微波辅助点火增强模式及其转化研究

吴慧珉¹, 张毅², 李荣杰¹, 刘超辉¹, 许景星¹, 王兆文¹, 成晓北¹

(1. 华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074; 2. 浙江吉利控股集团有限公司, 杭州 310051)

摘要: 基于微波辅助点火的定容弹台架, 对当量比为 0.7 下的甲烷-空气混合物进行了微波增强的点火试验。采用了功率诊断检测能量吸收, 并以等离子体在各个方向的冲击量化评估点火核心增强效果。研究表明, 随着微波功率的提高, 先后出现了两种表现特性截然不同的等离子体, 即辉光和炽光等离子体, 并分别对应不同的微波增强模式。随后研究了气体参数(气体压力、气体组分)对两种增强模式以及转换过程的影响, 研究表明, 较高的压力(0.4 MPa)能促进炽光等离子体的出现, 并能使增强效果的负压效应失效。此外, 甲烷能抑制炽光增强的发生, 这可能是由于其生成产物水和二氧化碳能削弱等离子体对微波能量的吸收。并且与氮气相比, 氧气更能使炽光增强的功率转变临界值提前。炽光增强模式下的能量吸收与入射功率间存在明显的线性关系, 此时等离子体内电子数密度相对稳定。

关键词: 微波辅助点火; 辉光增强; 炽光增强; 等离子体

中图分类号: TK401

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)02-0129-09

Microwave Assisted Ignition Enhancement Model and Its Transformation

Wu Huimin¹, Zhang Yi², Li Rongjie¹, Liu Chaohui¹, Xu Jingxing¹,
Wang Zhaowen¹, Cheng Xiaobei¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
2. Zhejiang Geely Holding Group, Hangzhou 310051, China)

Abstract: The ignition experiment of methane-air mixture with the equivalent ratio of 0.7 was carried out by microwave enhancement based on a constant volume bomb bench with microwave assisted ignition. Power diagnosis was used to detect energy absorption, and the effect of ignition kernel enhancement was evaluated by quantification of plasma impact in all directions. The results show that with the increase of microwave power, two kinds of plasma with distinctly different characteristics appear successively, namely glow plasma and incandescent plasma, which correspond to different microwave enhancement modes. Subsequently, the effects of gas parameters (gas pressure and gas composition) on the two enhancement modes and the conversion process were studied. The results show that higher pressure (0.4 MPa) can promote the emergence of incandescent plasma, and make the pressure constraint effect of enhancement ineffective. In addition, methane inhibits the enhancement of incandescence because the resulting water and carbon dioxide reduce the absorption of microwave energy by the plasma. Moreover, compared with nitrogen, oxygen can bring forward the critical value of the power transition of incan-

收稿日期: 2024-03-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51576083).

作者简介: 吴慧珉(1997—), 男, 博士研究生, wuhuimin@hust.edu.cn.

通信作者: 王兆文, 男, 博士, 教授, wangzhaowen1978@163.com.

descent enhancement. There is an obvious linear relationship between the energy absorption and the incident power in the incandescent enhancement, and the electron number density in the plasma is relatively stable.

Keywords: microwave assisted ignition; glow enhancement; incandescent enhancement; plasma

世界日益严峻的能源局势和严格的排放法规对内燃机的热效率和性能提出了更高的要求^[1]。稀薄燃烧技术以较低的当量比能使发动机压缩比得以加大以提高热效率。但传统火花塞受点火能量不足的限制难以稳定点燃稀薄混合气^[2]。相关研究^[3]表明,在刘易斯数(热扩散系数与质量扩散系数之比)大于1的情况下,点火核心的传播速度会经历先变小再增大的过程。此时若点火能量不足以使其在最小传播速度时突破最小点火半径,火核就会消散。因此,在火核发展时保证充足的能量供应是保证点火成功的关键。为了应对上述挑战,研究者们采用了各种手段,如介质阻挡放电、纳秒脉冲放电等对火焰发展初期的火核进行增强^[4-6],但它们却存在着装置复杂、成本较高等问题。

传统火花塞的点火会经过预击穿、击穿和电弧放电或辉光放电过程^[7],各个过程的电学特性(如电流大小,电子数密度等)有较大的差别。而在火花塞点火过程中加入微波进行增强点火,就是微波辅助点火(MAI)的概念^[8-9]。在此期间微波的加入会显著改变点火产生的等离子体的电学特性,微波中的高频电场能通过影响等离子体中的自由电子使其加速来沉积能量^[4]。加速后的高能电子可以碰撞燃料分子使其裂解并形成一些额外的自由基,如 $\text{OH}^{[10]}$,以增强点火的链分支反应。同时产生的热效应也能进一步促进点火的发生。由于MAI能与现有火花塞整合,具有不过多改变发动机结构的优点,因此是一种具有应用潜力的技术。

MAI在国内外已有一定研究进展,主要集中在发动机点火的宏观性能和定容弹的可视化研究。在单缸发动机和汽油机上的相关试验^[8-9,11]表明,在稀燃条件下,MAI在降低指示平均有效压力(IMEP)循环变动系数、稳定点火过程、扩大稀燃极限、加速点火核传播等方面具有诸多优点。在定容弹试验方面,改变气体参数,如增大压力或接近化学计量比的条件会削弱MAI的增强效果^[12],并分别将其解释为自由程缩短和火核发展速度快导致的电子耦合微波能量减少。但与气体参数相比,微波脉冲参数的影响则更加复杂。Wolk等^[12]采用定容燃烧室研究了微波脉冲辐射延迟对MAI的影响,发现约1.25 ms的轻微延

迟时间有利于MAI性能的提升。然而,Hwang等^[13]进行的类似研究却发现,提前0.5 ms的微波辐射对MAI性能更为有利。此外,微波脉冲频率也随着气体组分的不同而对MAI产生不同的影响,如二氧化碳的稀释会使高脉冲频率下的增强效果降低^[14]。

另一方面,微波能量也是影响MAI增强效果的一个重要参数,其影响探究对微波能量吸收等测量技术提出了较高的要求。相关试验^[15-16]从等离子体吸收能量的角度评判了微波参数对点火产生的作用。结果表明,点火增强效果的好坏与吸收的能量大小相关,并且微波辐射可以使等离子体内电子数增加,进而导致吸收功率增大。另外,研究发现了由电子数密度决定的不同能量吸收模式。高功率微波脉冲会使等离子体电子数密度快速增加并达到“饱和吸收模式”^[16]。但是,不同能量吸收模式对点火增强的影响尚未得到详细讨论,并且影响不同吸收模式形成的因素仍然未知。

因此,可针对以上提及的不同能量吸收模式和点火增强之间的关系进行研究,并通过调整微波脉冲入射功率来实现对能量吸收模式的控制。根据点火核心中等离子体的表现形态和能量吸收情况的不同,将微波脉冲对点火的增强分为辉光增强和炽光增强两种,并对不同增强模式下的增强效果进行讨论。研究了气体参数(即气体压力和气体组分)对这两种点火增强模式及其转变的影响,并对其原因加以解释。

1 试验装置及方案

1.1 试验装置

图1为试验装置示意,试验台架的详细描述可参照以往研究^[16],在这里只做简单介绍。试验在1.6 L定容燃烧室(CVCC)中进行。点火系统由一个商用火花塞和一个点火线圈组成。点火电路充电时间固定为3 ms。在点火过程中,点火电压和电流分别由高压探头(Tektronix, P6015 A)和电流探头(Tektronix, TCP 312)测量。为了确定等离子体吸收的微波能量,采用两个功率探测器(Eclipse MDI, EZM2040N)测量入射功率和反射功率。相关数据由示波器记录以计算点火能量。在所有试验条件下计算的火花点火能

量恒定在 (33.1 ± 3) mJ. 自制的火花塞通过拉长中心电极并正对自制微波天线以形成对针结构. 两个电极之间的距离为 1.0 mm, 且尖端的锥角约为 20° . 使用固态微波源以产生 2.45 GHz 的微波, 并通过同轴电缆传递至天线最后馈入 CVCC 中. 为了研究点火核以及微波等离子体形态, 使用了具有高速摄像机

(Photron, Mini AX200) 和显微镜镜头 (尼康, AF-S 105 mm) 的直线型纹影系统, 分辨率可达到 0.0125 mm/像素, 记录速度为 12 万帧/s, 曝光时间为 $8.33 \mu\text{s}$. 摄像机在点火前 0.3 ms 触发以覆盖整个点火过程.

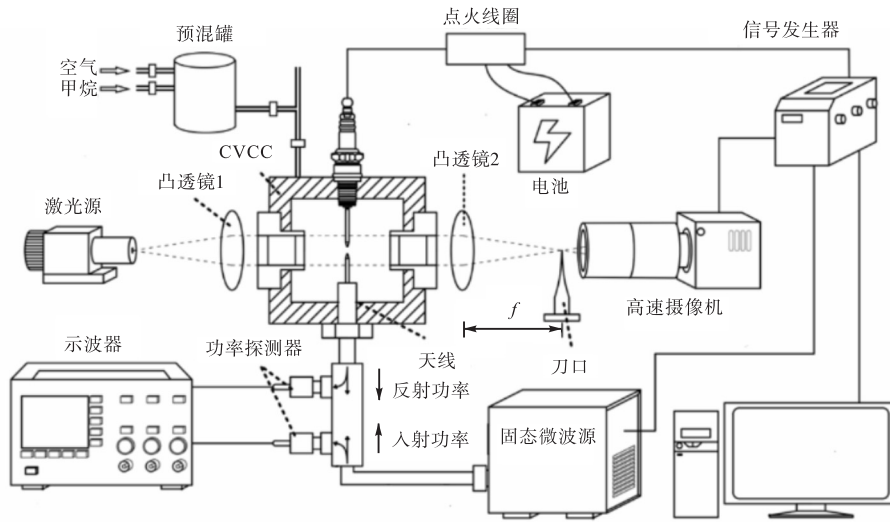


图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup

每次试验前, 定容燃烧弹加热并保持在 (373 ± 5) K, 并安装压电压力传感器 (Kistler 6125 C) 监测瞬态压力. 可燃混合气由纯空气、甲烷和额外的氮气/氧气组成并在 12 L 预混罐中制备, 然后充入 CVCC. 本文的甲烷-空气当量比固定为 0.7, 在确保点火成功的同时能凸显微波的增强效果. 试验中额外的氮气或氧气的添加比定义为额外气体与总气体的体积比.

图 2 显示了触发脉冲的时序同步. 信号发生器 (Fastlaser Tech, TFG-VII) 发出 3 个脉冲来触发摄像机、微波源和点火线圈. 在点火后, 以 0.325 ms 的延迟向点火核发射脉冲宽度为 0.2 ms 的单个微波脉冲.

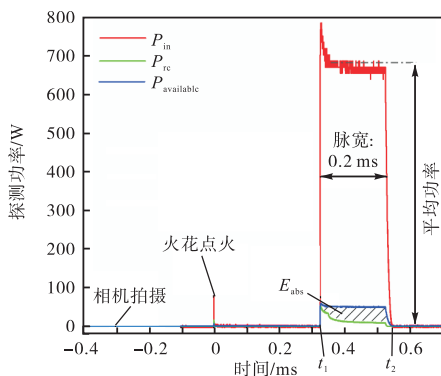


图 2 脉冲定时配置

Fig.2 Sketch of pulse timing configuration

1.2 试验方案与数据处理

由于在之前的研究中, 仅仅只是对馈入定容弹内的微波能量进行大致估算, 如在文献 [17] 中的 150 mJ, 如此得到的等离子体能量吸收并不准确. 因此本文采用了功率诊断的方法, 对等离子体吸收的微波能量进行计算. 试验中探测到的微波入射能量与反射能量的差值主要包括两部分: CVCC 内部结构导致的能量损失和点火核吸收的能量, 前一部分能量损失只取决于 CVCC 的内部结构 [16]. 因此, 试验中首先测量了未点火时的能量损失, 得到未点火时的反射功率与入射功率的关系, 如式 (1) 所示, 其置信度为 97%. 之后再测量点火时的反射功率, 两者的差即为点火时火核总吸收能量, 计算如 (2) 式所示.

$$P_{\text{available}} = 0.06373P_{\text{in}} + 3.167 \quad (1)$$

$$E_{\text{abs}} = \int_{t_1}^{t_2} ((0.06373P_{\text{in}} + 3.167) - P_{\text{re}}) dt \quad (2)$$

式中: E_{abs} 为点火核吸收的能量; t_1 和 t_2 分别为微波脉冲开始和结束的时间; P_{in} 和 P_{re} 分别为点火时的入射功率和反射功率; $P_{\text{available}}$ 为未点火时微波的可用功率. 图 2 展示了脉冲功率示意图, 其中的条纹区域即是点火核所吸收的能量. 具体试验方案如表 1 所示.

不同于文献 [12, 14] 中将火核面积或等效半径的相对增长作为评判指标, 为了评估火核的增强效果, 在考虑点火时微波等离子体射流方向性 [14] 的情况下

采用了改进后的增强指标以更好地突出微波在各个方向上的点火增强. 将火核沿顺时针方向均分为图 3 的 6 个部分, 并用 Matlab 程序对图像进行处理.

表 1 试验方案设置

Tab.1 Experiment scheme setting

入射功率/W	气体压力/MPa	气体组分
0 ~ 1 000	0.1	甲烷+空气
0 ~ 1 000	0.1 ~ 0.4	甲烷+空气
0 ~ 1 000	0.1	甲烷/氮气/氧气+空气

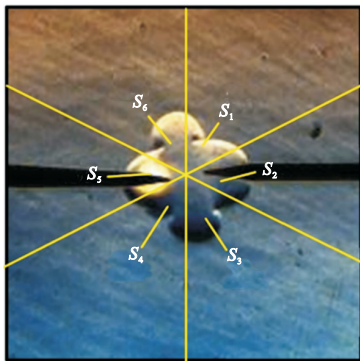


图 3 点火火核以及面积分割

Fig.3 Schematic diagram of ignition kernel and area division

具体的微波增强指数公式如式 (3) 所示. 其表征的意义是, 将每个时刻下 6 个方向的微波增强与增强之前进行比较并归一化, 最后对每个时刻和方向的增强进行积分整合.

$$I_{EI} = \sum_{i=1}^6 \int \frac{d(\sqrt{S_{MAL,i}}) - d(\sqrt{S_{SL,i}})}{d(\sqrt{S_{SL,i}})} dt \quad (3)$$

式中: $S_{MAL,i}$ 为微波辅助点火时第 i 部分的点火核面积; $S_{SL,i}$ 为火花点火时第 i 部分的点火核面积.

2 结果与分析

2.1 微波辅助点火的不同增强模式

2.1.1 不同增强模式下的点火表现

图 4 展现了微波入射功率为 0 ~ 1 000 W 的情况下, 火核随时间发展的变化情况. 可以看到在点火后的 0.3 ms 内, 火焰核心主要朝与电极垂直的方向发展, 此时微波还未馈入. 因此该时间段内火核的发展主要受到电极散热的限制, 并主要限制了水平方向的火焰发展.

当微波入射功率为 300 W 时, 火核图像与功率为 0 的情况并未体现出明显区别 (未增强). 但是当功率达到 400 ~ 750 W 时, 微波馈入时间段内 (如图中 0.400 ms) 出现了蓝紫色的辉光等离子体, 但此时

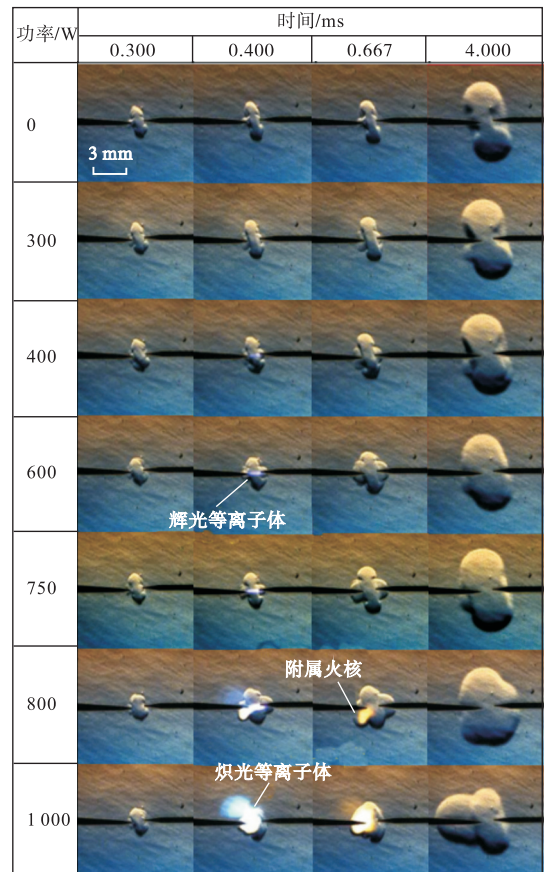


图 4 不同微波入射功率下点火核随时间的变化

Fig.4 Schematic diagram of ignition kernel development under different microwave powers

的等离子体体积较小, 亮度较低. 而由于微波能量的馈入, 火核在水平方向得以继续发展, 这说明微波的加入在一定程度上可克服电极散热带来的影响. 因此当微波关闭后, 水平方向的火核发展重新受到限制, 火核面积的增长主要体现在垂直方向. 随着功率继续增大 (大于 800 W) 时, 电极间的等离子体性质发生了显著变化. 当入射功率为 800 W 时, 与 750 W 相比, 等离子体颜色变成了蓝白色, 其亮度和体积明显变大, 并且等离子体更加靠近天线侧. 仅仅 50 W 的功率增大却导致等离子体性质如此显著的区别, 表明这两种等离子体不能简单被归为一类. 为了与辉光等离子体区别开, 将蓝白色的等离子体命名为炽光等离子体.

随着火核持续传播, 炽光等离子体依旧可以给火核带来更加持久和明显的影响. 较大的等离子体体积甚至影响到了火核表面, 给火焰锋面带去大量热量的同时还传输了额外的自由基促进反应^[10]. 因此即便当微波关闭后, 炽光等离子体带来的影响仍然持续到了后期 (4.000 ms). 与辉光等离子体相比, 炽光等离子体对火核锋面的冲击形成了附属点火核, 对火核

的水平方向造成显著增强. 为了具体量化等离子体对点火核心的增强效果, 将增强指数 I_{EI} 与微波入射功率的关系绘制如图 5 所示.

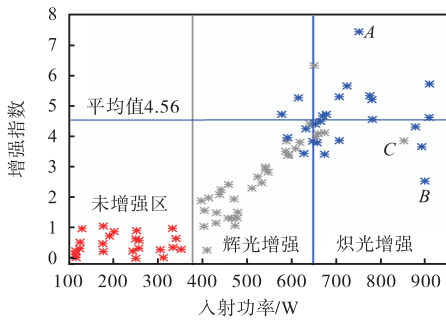


图 5 点火增强指数与微波入射功率关系

Fig.5 Schematic diagram of ignition enhancement index EI under different microwave powers

图 5 直观地显示出了微波增强点火过程中增强效果随功率变化的 3 个阶段. 在未增强区 (0 ~ 370 W), 增强指数均小于 1, 意味着较小的微波功率并没有带来明显的增强效果, 这与图 4 中未增强区点火核发展图像相互吻合. 而在辉光增强区 (370 ~ 650 W), 增强指数与入射功率之间近似呈现线性关系. 当微波功率进入炽光增强区 (大于 650 W) 时, 数据点的离散程度变大, 并且增强指数差异较大. 从点 A 的 7.43 到点 B 的 2.53, 表明了炽光增强带来的增强效果并不稳定, 这与等离子体产生的空间分布随机性有关. 但是即便如此, 炽光增强的增强指数平均值依然达到了 4.56, 高于辉光增强的增强指数值. 值得注意的是, 图 5 中两种等离子体的数据点是根据入射功率与反射功率之差, 即吸收功率曲线特征以及等离子体特征来区分, 而非仅仅是入射功率, 如图 6 及 2.12 节分析所示. 因此不同增强区间里的数据点会有所交叉, 但图 5 中点 B 和点 C 增强指数的表现异常也表明了影响点火增强模式的因素可能不仅仅是入射功率.

2.1.2 不同增强模式下的能量分析

图 6 显示了微波脉冲期间探测功率随时间的变化情况, 可以看到不同吸收功率下的等离子体表现有所不同. 在微波馈入的 0.056 ms 内, 等离子体吸收的能量不断上升, 而在此期间内辉光等离子体得以产生. 在 0.056 ms 后, 等离子体的吸收功率基本维持在 35 W, 即“饱和吸收”^[16], 辉光等离子体也随之转变为炽光等离子体. 这种等离子体性质变化与能量吸收变化之间体现出的时间一致性也说明了炽光等离子体的出现与能量吸收的多少有关.

为了进一步说明这一点, 图 7 给出了等离子体能量吸收与入射功率之间的关系. 在图中可见, 不同增

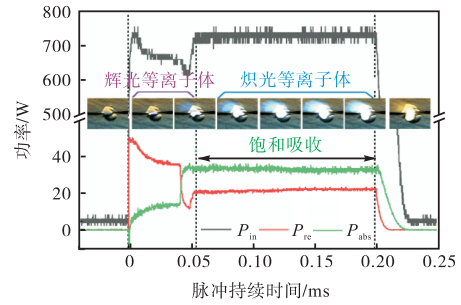


图 6 微波脉冲期间探测功率变化

Fig.6 Schematic diagram of detected power variation during microwave pulse

强阶段内的能量吸收情况有明显差异. 在未增强区域, 等离子体吸收的微波能量大约在 0.5 mJ, 与点火能量 (33.1 mJ) 相比相差了两个数量级, 这显然并不会对点火核造成明显的影响. 在辉光增强区域, 能量吸收随入射功率的增大而增大. 相关文献指出^[18-20], 等离子体对微波能量的吸收与等离子体性质 (如电子密度, 体积大小等) 和入射功率有关, 其中吸收功率 P_{ab} 与入射功率 P_{in} 近似呈线性关系, 如 (4) 式所示.

$$P_{ab} = Aen_e\mu_e P_{in}V \quad (4)$$

式中: A 可设为 1; e 为元电荷; μ_e 为电子迁移率; n_e 为电子数密度; V 为等离子体体积. 后三者可表征等离子体性质. 考虑到在图 7 中, 入射功率 P_{in} 是线性增加的, 因此, 图中所示的近二次方关系表明辉光等离子体性质随能量吸收的增大而变化. 而当入射功率进一步增大至炽光增强区域时, 能量吸收值从 4.0 mJ 迅速上升至 7.0 mJ. 根据式 (4), 说明等离子体性质也发生了突变, 这也印证了并不能简单将两种等离子体归为一类.

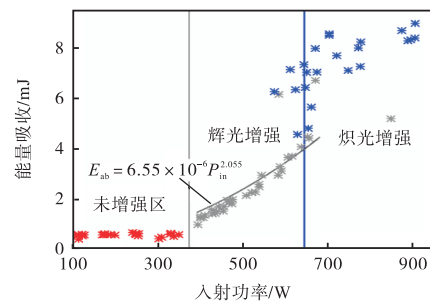


图 7 能量吸收随入射功率变化关系

Fig.7 Schematic diagram of energy absorption under different microwave powers

综上所述, 微波功率可影响点火时等离子体的生成, 根据微波辅助点火过程中等离子体的特性变化和能量吸收情况, 将其增强模式分为未增强、辉光和炽光增强 3 个阶段. 在未增强区, 由于等离子体极少的能量吸收, 对点火几乎没有增强. 对辉光增强而言,

在微波馈入时, 等离子体对微波能量的吸收随功率增大而增大, 但等离子体并未对火焰锋面造成冲击. 在某一功率点处, 微波能量的吸收发生跃迁, 产生了炽光等离子体得以冲击火核锋面. 将此时的点火增强效果称为炽光增强, 该阶段对火核有更显著的增强表现, 但效果并不稳定.

2.2 气体参数对增强模式转变的影响

2.2.1 气体压力的影响

环境压力会影响电子数密度和等离子体体积, 根据式 (4), 这会改变火核对微波能量吸收, 因此需要研究气体压力对两种增强及其转变的影响. 图 8 展示了不同气体压力下能量吸收随微波功率的变化. 在所有压力工况下未增强区的能量吸收并未显示出明显区别. 但辉光增强(除 0.4 MPa 外)时的能量吸收随压力的增大而减少, 这与已有的相关研究^[8]中所提到的负压效应一致. 然而不同压力下微波增强模式的转变情况却有所差异. 压力较大的工况下的辉光增强会更先一步转变至炽光增强, 对应入射功率的临界值有所提前, 例如 0.15 MPa 下的 640.1 W 和 0.2 MPa 下的 612.4 W. 随着压力进一步提升至 0.4 MPa, 辉光增强被直接跳过, 等离子体在入射功率为 416.5 W 的情况下直接转变成炽光等离子体. 相比起未增强情况, 能量吸收有大约 1.5 mJ 的突变. 因此, 在 400 ~ 600 W 的区间内, 能量吸收的负压效应出现了异常情况, 在较高压力 0.4 MPa 情况下等离子体吸收了更多能量. 而在炽光增强区域, 不同压力下的能量吸收与入射功率之间呈现出线性关系, 这似乎也表明了炽光增强模式下的能量饱和吸收与环境压力无关. 由于微波主要影响等离子体中的自由电子, 当入射功率足够大时, 因气体压力引起的初始等离子体内的电子数量差异带来的影响相对减弱. 此时电子数在微波能量入射的影响下在微波辐射时间内最终都会达到“饱和吸收模式”, 即电子数密度相对稳定的状态^[16], 这时能量吸收主要由入射功率决定. 产生这种电子数密度稳定状态的原因在于: 微波作用于等离子体所具有的截止效应^[12, 21], 即当微波频率小于等离子体特征频率 ω_p 时, 微波将不能穿过并作用于等离子体. 而等离子体特征频率主要取决于电子数密度 n_e . 因此当微波能量的馈入使得等离子体性质, 如电子数密度(见式(4))增大时, 等离子体特征频率变大并逐渐达到微波频率 2.45 GHz. 此时 ω_p 若大于 2.45 GHz, 截止效应发生. 反之, 微波能量的馈入使其继续增长并因此达到动态平衡, 即电子数密度保持稳定. 这种现象在相似装置^[16]中通过测量电流电压的方法得以证实.

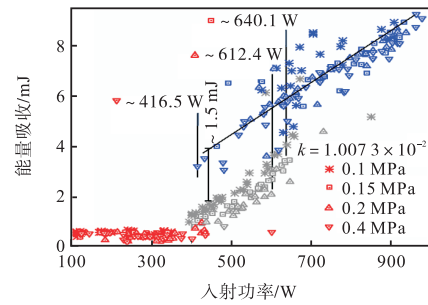
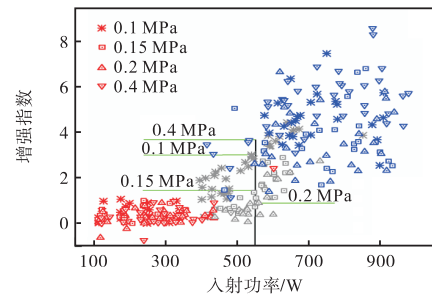
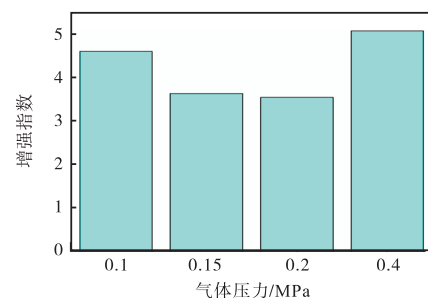


图 8 不同气体压力下能量吸收随微波功率的变化
Fig.8 Schematic diagram of energy absorption with microwave power under different gas pressures

从微波增强指数的角度看, 如图 9(a) 所示, 当微波功率在 400 W 以下时, 各个压力下的增强指数并没有显示出较大区别, 增强指数均小于 1 表明点火均未得到增强. 当入射功率逐渐增大, 压力增大带来的增强效果减弱逐渐显现. 当压力低于 0.2 MPa 时, 增强指数显示出了与能量吸收相似的负压效应. 如功率 550 W 情况下, 0.1 MPa 和 0.2 MPa 的增强指数逐渐减小, 但 0.4 MPa 下的增强指数却直接大于其他低压情况. 这与能量吸收所表现出的趋势相一致. 而当所有工况进入炽光增强区时, 增强指数的分布逐渐分散, 这表明炽光增强带来的火核发展的空间随机性增



(a) 入射功率的影响



(b) 气体压力的影响

图 9 不同气体压力下增强指数和入射功率之间的关系以及炽光增强时增强指数随气体压力的变化

Fig.9 The relationship between the enhancement index and the incident power under different gas pressures and the variation of the enhancement index with gas pressure under incandescent enhancement

加. 为了直观显示压力对炽光增强的影响, 将炽光增强区各个压力下的增强指数取平均, 并在图 9(b) 中表示. 此时可以见到 0.1 ~ 0.2 MPa 内的压力对增强指数的影响趋势与辉光增强类似. 这是因为能量吸收分析中所提到的, 不同压力导致的能量吸收趋于相同(图 8 中的线性关系), 因此负压效应带来的影响得以体现. 而此时图中 0.4 MPa 的反常表现表明了较高的压力可以使得炽光等离子体对火核的增强突破负压效应. 同时, 由 0.1 ~ 0.2 MPa 的增强指数下降幅度不断减弱可以推测, 压力增大能使得电极附近燃料浓度上升, 点火产生的热效应得以加大以不断抵消负压效应的影响.

2.2.2 气体组分的影响

为了区分主导以上增强模式转变的气体, 同时验证关于线性关系解释的正确性, 除了气体压力外, 还研究了气体组分对微波增强转变的影响. 图 10 是不同气体组分下的微波能量吸收. 不同组分的气体在未增强区与辉光增强区的表现相同, 能量吸收均保持在低水平. 而不同空气组分所带来的影响主要体现在从辉光增强到炽光增强转变的入射功率临界值不同. 此外, 炽光增强时能量吸收与入射功率之间表现出与 2.2.1 节相似的线性关系, 如图中所示, 两者间的差异仅为 7.5%. 因此也验证了炽光增强所表现的稳定电子数密度与气体的属性无关.

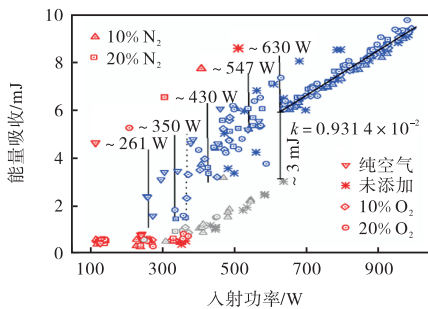


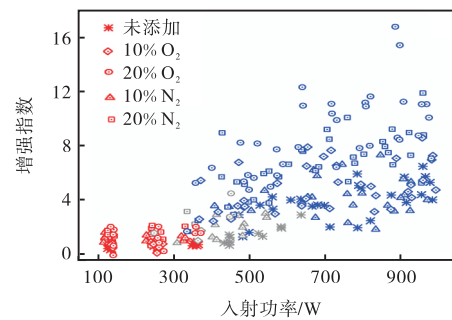
图 10 不同气体组分下能量吸收随入射功率变化

Fig.10 Schematic diagram of energy absorption with incident power under different gas components

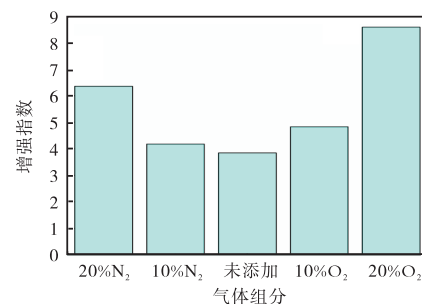
关于不同增强模式的转变临界值不同, 其原因在于, 甲烷的加入抑制了炽光等离子体的产生. 在未添加额外气体与其他气体组分, 特别是与纯空气的比较中, 可以看见后者的炽光增强转变临界值大幅延后. 而与添加额外氮气或氧气的情况相比, 甲烷的相对含量减少, 因此其转变临界值更接近纯空气. 在甲烷点火燃烧的过程中, 二氧化碳和水在电极之间生成, 对微波辐射以及等离子体中的电子数造成了影响. 一方面, 二氧化碳能加快气体放电过程中自由电子的衰减率^[14], 导致等离子体中的电子数减少, 微波

在相同功率情况下难以在特定时间内促进自由电子达到饱和和吸收模式下的所需数目. 另一方面, 燃烧生成的水分子的共振频率与 2.45 GHz 的微波相近^[22], 微波能量更多地被水分子的共振加热吸收. 在这样的情况下, 微波需要更高的入射功率才能使等离子体的增强模式发生转变. 值得注意的是, 氧气作为电负性气体, 与氮气相比本应更容易吸附自由电子, 从而对气体放电起抑制作用. 然而额外添加氧气的工况却比添加氮气的工况的临界转变值低. 一种解释为, 微波的加入使得自由电子加速至更高速并具备足够动能, 氧气分子与电子之间的碰撞不再产生吸附反应而是直接进行电离反应. 此外, 与氮气(15.58 eV)相比, 氧气的电离能(12.06 eV)更低^[23], 上述的电离反应更容易发生. 因此在加入微波的情况下, 氧气的添加与氮气相比更能在一定程度上促进等离子体的发展, 造成临界功率值的提前, 如图中添加比为 20% 时功率临界值提前 80 W.

图 11(a) 所示为不同气体组分下增强指数随入射功率变化. 在较小功率的微波影响下, 添加了氧气或氮气工况的增强指数有略微提升, 其原因便是甲烷的相对含量降低, 但仍然不具有明显的增强效果. 随着



(a) 入射功率的影响



(b) 气体组分的影响

图 11 不同气体组分下增强指数随入射功率变化以及炽光增强时增强指数随气体组分变化

Fig.11 The relationship between the enhancement index and the incident power under different gas components and the variation of the enhancement index with gas components under incandescent enhancement

微波能量的逐渐加大,率先达到炽光增强的气体,如20%氧气,其增强指数明显大于还在辉光增强区域气体的增强指数.未达到炽光区的10%氮气增强指数大于未添加情况,这与能量吸收的表现相符合.然而,当功率持续加大至所有气体均出现炽光等离子体,数据点之间的离散程度增加,特别是添加了额外气体的情况.原因除了等离子体发展的随机性外,还有额外气体带来的稀释作用.额外气体的含量越多,甲烷被稀释的程度越大,点火也愈加不稳定,正如图中的20%氮气和20%氧气,火核发展的随机性显著强于其他工况.图11(b)展示了所有工况气体炽光增强模式下的增强指数平均值.可见未添加额外气体的情况增强指数最低,而其他情况的增强指数随添加比例增加而变大.这是因为增强指数表征微波对火花点火的增强幅度.在有添加气的情况下,原混合气得到不同程度的稀释.在不馈入微波进行增强的情况下,火核发展缓慢,增强后微波等离子体对火核的促进效果明显,而在未稀释情况下,火核本身发展较快,等离子体对火核的冲击效果减弱,增强效果变差^[24].因此显示出如图11(b)所示的变化趋势.

综上所述,气体参数对微波增强模式的转变过程影响比较复杂.首先,压力增大至一定程度前,负压效应仍然存在.但压力足够大时,微波的增强效果变得显著.其次,甲烷的加入会使得炽光等离子体的出现延后,而氧气相较于氮气更能使微波的促进效果增强.但无论气体参数如何,微波功率增大到较大值时等离子体的能量吸收趋于一致,这与电子数密度达到相对稳定状态有关.

3 结 论

(1)在微波增强点火的过程中,存在两种点火增强模式,对应着两种能量吸收规律和表现特性都不同的点火等离子体.与辉光增强相比,炽光增强能吸收更多的微波能量,但增强指数的波动也随之变大.

(2)较高的环境压力(0.4 MPa)下炽光等离子体出现的功率临界值提前至416.5 W,并能使负压效应失效.甲烷比例的增加能抑制炽光等离子体的产生,这与其生成产物水和二氧化碳能削弱等离子体对微波能量的吸收有关.在同等添加比下,氧气相比于氮气能使炽光等离子体产生的功率临界值提前,如20%的添加比可将功率临界值提前80 W.

(3)炽光增强模式的能量吸收与入射功率间存在明显的线性关系而与气体属性无关,此时等离子体内电子数密度相对稳定.

参考文献

- [1] 帅石金, 王志, 马 骁, 等. 碳中和背景下内燃机低碳和零碳技术路径及关键技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2021, 12(4): 417-439.
Shuai Shijin, Wang Zhi, Ma Xiao, et al. Low carbon and zero carbon technology paths and key technologies of ICEs under the background of carbon neutrality[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2021, 12(4): 417-439(in Chinese).
- [2] 吴锡江, 王志宇, 尹 琪. 高能点火在稀薄燃烧汽油机中的影响因素研究[J]. 车用发动机, 2020(5): 1-10, 72.
Wu Xijiang, Wang Zhiyu, Yin Qi. Influencing factors of high-energy ignition in lean-burn gasoline engine[J]. *Vehicle Engine*, 2020(5): 1-10, 72(in Chinese).
- [3] Kelley Andrew P, Jomaas Grunde, Law Chung K. Critical radius for sustained propagation of spark-ignited spherical flames[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(5): 1006-1013.
- [4] Ju Yiguang, Sun Wenting. Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 48: 21-83.
- [5] Balmelli M, Merotto L, Soltic P, et al. Ignition detection with the breakdown voltage measurement during nanosecond repetitively pulsed discharges[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 292: 117382.
- [6] Patel Ravi, van Oijen Jeroen, Dam Nico, et al. Low-temperature filamentary plasma for ignition-stabilized combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 247: 112501.
- [7] Maly Rudolf. Spark ignition: Its physics and effect on the internal combustion engine[M]//Hilliard John C, Springer George S. *Fuel Economy: in Road Vehicles Powered by Spark Ignition Engines*. Boston, MA, 1984: 91-148.
- [8] Ikeda Yuji, Nishiyama Atsushi, Kaneko Masashi. Microwave enhanced ignition process for fuel mixture at elevated pressure of 1 MPa[C]//47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, 2009.
- [9] DeFilippo A, Saxena S, Rapp V, et al. Extending the lean stability limits of gasoline using a microwave-assisted spark plug[J]. *SAE Technical Paper*, 2011: 2011-01-0663.
- [10] Rao Xing, Hemawan Kadek, Wichman Indrek, et al.

- Combustion dynamics for energetically enhanced flames using direct microwave energy coupling[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3233-3240.
- [11] Hwang Joonsik, Kim Wooyeong, Bae Choongsik. Influence of plasma-assisted ignition on flame propagation and performance in a spark-ignition engine [J]. *Applications in Energy and Combustion Science*, 2021, 6: 100029.
- [12] Wolk Benjamin, DeFilippo Anthony, Chen Jyh-Yuan, et al. Enhancement of flame development by microwave-assisted spark ignition in constant volume combustion chamber[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(7): 1225-1234.
- [13] Hwang Joonsik, Bae Choongsik, Park Jooyoung, et al. Microwave-assisted plasma ignition in a constant volume combustion chamber[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 167: 86-96.
- [14] Zhang Xinhua, Wang Zhaowen, Wu Huimin, et al. Propulsive effect of microwave-induced plasma jet on spark ignition of CO₂-diluted CH₄-air mixture[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 229: 111400.
- [15] Nishiyama Atsushi, Moon Ahsa, Ikeda Yuji, et al. Ignition characteristics of methane/air premixed mixture by microwave-enhanced laser-induced breakdown plasma [J]. *Optics Express*, 2013, 21(s6): A1094-A1101.
- [16] Wu Huimin, Wang Zhaowen, Cheng Xiaobei, et al. Effect of microwave pulse parameters on energy coupling and enhancement of microwave assisted ignition[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, 39(4): 5531-5539.
- [17] Zhang Xinhua, Wang Zhaowen, Zhou Dong, et al. Strengthening effect of microwave on spark ignited spherical expanding flames of methane-air mixture[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 224: 113368.
- [18] Dedic Chloe E, Michael James B. Thermalization dynamics in a pulsed microwave plasma-enhanced laminar flame[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 227: 322-334.
- [19] Karoulina E V, Lebedev Yu A. The influence of the electron transport cross sectional shape on electron energy distribution functions in DC and microwave plasmas[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1988, 21(3): 411-417.
- [20] Shah Jayna J, Sundaresan Siddarth G, Geist Jon, et al. Microwave dielectric heating of fluids in an integrated microfluidic device[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2007, 17(11): 2224-2230.
- [21] Zhang Kai, Zhang Qingming, Long Renrong, et al. Time-frequency characteristics of microwaves generated by hypervelocity impact[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 174: 104505.
- [22] Farag Sherif, Sobhy Amr, Akyel Cevdet, et al. Temperature profile prediction within selected materials heated by microwaves at 2.45 GHz[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2012, 36: 360-369.
- [23] Yang Zhenyi, Zhu Hua, Yu Xiao, et al. Spark plasma in different gas media under flow conditions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(1): 104-108.
- [24] 吴慧珉, 王兆文, 张新华, 等. 微波特性对放电/点火核心形貌特征影响[J]. *内燃机学报*, 2022, 40(1): 20-28.
- Wu Huimin, Wang Zhaowen, Zhang Xinhua, et al. Experimental study on discharge and flame kernel appearance under different microwave parameters[J]. *Transactions of CSICE*, 2020, 40(1): 20-28(in Chinese).