

非平衡等离子体点火助燃的研究进展

邓江革, 李 挺

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 从等离子体点火助燃燃烧实验、等离子体助燃的先进激光诊断和等离子体助燃机理三个方面进行概述, 总结近些年来国内外对非平衡等离子体点火助燃研究的主要成果。等离子体辅助点火燃烧的最新进展有: 辅助冷焰进行的燃烧学基础研究, 辅助低热值燃料以及氨等的相关实验研究, 等离子体强化贫燃火焰稳定性的研究, 混合不同类型放电等离子体点火助燃的仿真计算以及等离子体助燃仿真新模型的建立等。认为在等离子体辅助点火燃烧技术的研究仍应以实验研究为主, 积累大量实验数据和经验以支撑进一步的研发和应用; 并且在实验中, 应多结合不同等离子体以及不同类型等离子体的特点, 充分利用其优点, 使用混合放电最大化其作用效果。

关 键 词: 非平衡放电等离子体; 等离子体助燃; 等离子体诊断; 等离子体化学动力学; 燃烧室多物理场耦合

中图分类号: V231.2; O53

文献标志码: A

Research progress on non-equilibrium plasma-assisted ignition and combustion

DENG Jiangge, LI Ting

(School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Three aspects including plasma-assisted ignition and combustion experiments, plasma-assisted combustion diagnosis, and plasma-assisted combustion mechanism were reviewed respectively, and the latest results of the research on non-equilibrium plasma ignition and combustion were summarized. New advances in plasma-assisted combustion include: basic combustion research on plasma assisted cold flame, experimental studies of plasma assisted low-calorific fuel and ammonia combustion, studies of plasma-enhanced flame stability, simulation of hybrid discharge plasma-assisted ignition and combustion, and the establishment of new models of plasma-assisted combustion simulation, etc. It was believed that the relevant research should be centered on the experimental studies, then a wealth of data and experience could be accumulated for further research and applications; and different types of plasma should be considered carefully and their advantages should be fully utilized in experiments, because using the hybrid discharge plasma could maximize their effects on assisting ignition and combustion.

Keywords: non-equilibrium discharge plasma; plasma-assisted combustion; plasma diagnostic; plasma chemical kinetics; multi-physical coupled in combustor

等离子体是指部分或完全电离的、由带电正离子、负离子组成而整体展现电中性的集合体, 常被认为是区别于固、液、气的物质存在第四态, 在研究中经常通过放电的方式产生等离子体, 由

于其温度高常在燃烧器中作为点火源, 例如火花塞。等离子体辅助点火(PAI)和辅助燃烧(PAC)自提出以来有了广泛的研究, 等离子体按照电子温度和离子温度是否相等分为平衡等离子体和非

收稿日期: 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重大仪器专项(61827802); 国家科技重大专项(J2019-III-0016-0060)

作者简介: 邓江革(1997—), 男, 博士生, 主要从事等离子体辅助点火和先进激光诊断研究。

引用格式: 邓江革, 李挺. 非平衡等离子体点火助燃的研究进展[J]. 航空动力学报, 2022, 37(10): 2295-2309. DENG Jiangge, LI Ting. Research progress on non-equilibrium plasma-assisted ignition and combustion[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(10): 2295-2309.

平衡等离子体,如火花塞和等离子体炬就属于平衡等离子体,而辉光放电、介质阻挡放电、纳秒脉冲放电、微波诱导放电等则属于非平衡等离子体。相比较而言非平衡等离子体具有更高的电子温度(1~100 eV),化学活性强,粒子碰撞剧烈,能迅速产生大量活性自由基和激发态粒子,且放电的瞬时功率极高(~GW),能在有效较大的空间范围内快速释放能量,能明显促进点火效果和组织燃烧,因此成为了等离子体点火助燃方面的研究重点^[1]。

航空发动机燃烧室作为航空发动机核心部件,其再点火高度、燃烧稳定性、燃烧效率、熄火边界、污染物排放等性能仍为发展先进航空发动机、高效率低排放航空发动机的研究热点。非平衡放电等离子体强化点火可以认为是强化的火花点火器,在高速的燃料-空气混合气环境下组织放电,能让等离子体与燃料直接接触充分反应,有效拓宽燃料点火极限,并且可以在较大面积上进行点火,同时放电带来的大量高能电子、激发态活性粒子能降低反应活化能,从而降低点火延迟时间,非平衡等离子体的电子温度高,产生的活性粒子浓度高、能量高,能一定程度促进燃烧反应进行,提高吹熄极限和贫富油燃烧极限,增强燃烧稳定性,大量的实验研究已经证明了等离子体强化点火和助燃的有效性^[2-4]。还有些学者认为等离子体是极具前景的燃烧室内主动控制手段^[5-6],等离子体放电激励器具有体积小、可靠性高、响应快、带宽高、无运动部件、能极端环境工作等优点,等离子体放电作用下的火焰表现出更好的稳定性,是相比活塞、射流、扬声器等更为理想的主动控制激励器。工程实际上,产生非平衡等离子体的方式多样,比较常用的有射频等离子体^[7]、微波等离子体^[8-9]、纳秒脉冲放电等离子体^[10-12]、滑动弧(旋转)等离子体^[13]、激光诱导等离子体^[14]、介质阻挡放电^[15-16]等,不同形式的等离子体在电子温度、电子密度以及激发的活性分子种类上一定的差异,从而有着不同的热效应、扩散效应以及动力学特性,这些基本特性在JU等的综述文章中进行了总结^[17]。对于等离子体源的选择与设置应结合燃烧室需求进行设计。

本文总结等离子体助燃提出以来取得的重大成果以及近期国际上相关研究,讨论放电非平衡等离子体在稳定燃烧方面产生的作用以及原理,另提出个人在等离子体点火助燃研究领域的观点和展望。

1 非平衡等离子体点火助燃的基本原理

由于不同非平衡等离子体性质的巨大差异,其作用于点火燃烧的方式也存在区别,但主要还是通过图1中所展示的几种路径。①等离子体的热效应能提高反应区温度,根据 Arrhenius 公式,可以加速燃料燃烧化学反应;②等离子体电离生成高能电子和离子,然后又通过碰撞、离解等过程进一步生成活性自由基(如原子 O, 原子 H, OH 基等)和不同激发态分子,能降低燃烧反应活化能,提高点火可靠性和燃烧稳定性,此外还能生成活性物质(如 O₃)和具有催化作用的中间物质(如 NO),能加速燃料的低温氧化,尽管动力学强化的基本过程相似,但不同等离子体的电子能量和电子密度不同,产生的活性粒子和激发态分子存在差异,实际上的碰撞过程和参与反应各不相同;③等离子体的输运强化主要有两方面的原因,等离子体可以将大的燃料分子分解成小的燃料碎片^[18],从而可以改变燃料的扩散性影响燃烧过程,另外强电场下的离子风以及等离子体自身的不稳定性会提高流动湍流度强化掺混。非平衡等离子体点火助燃往往是这三种强化过程耦合在一起的复杂过程,等离子体的热效应加速动力学过程,动力学强化加速燃料氧化强化释热促进掺混,同时热效应和动力学效应的传递又依赖于输运过程。

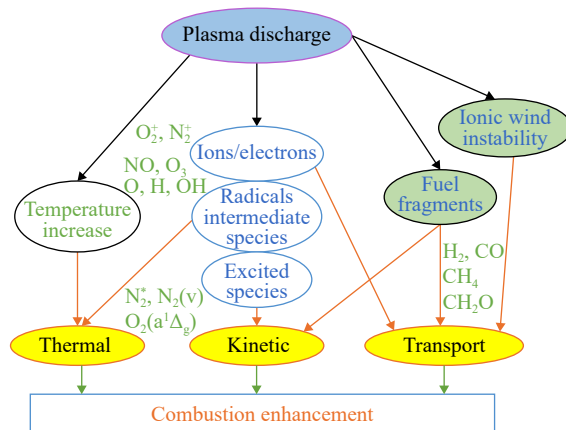


图1 等离子体点火助燃的主要强化路径^[17]

Fig. 1 Main enhancement path for plasma-assisted ignition and combustion^[17]

2 非平衡等离子体点火助燃研究现状

就目前来看,非平衡等离子体在点火助燃领域的相关研究仍主要是以其对点火极限、点火延

迟时间、吹熄极限、燃烧稳定性、燃烧效率等的影响而开展的实验研究,大量的研究已证明了非平衡等离子体点火助燃的有效性;并且随着先进诊断技术的应用,基本上已经理解了等离子体作用下点火燃烧的基本原理和主要过程,包括等离子体的热效应和扩散效应,以及等离子体带来的活性粒子:原子 O、 $O_2(a^1\Delta g)$ 、 $N_2(A)$ 、 $N_2(B)$ 等粒子在点火和助燃中的重要作用。关于非平衡等离子体点火助燃的计算模型和仿真研究,主要是以燃烧模型和气体放电模型为基础开展的。由于放电等离子体和湍流燃烧基元反应时间尺度与燃烧室内的流动和传热的时间尺度存在数量级上的差异,以及等离子体产生的高能粒子发生碰撞的空间尺度和湍流、火焰锋面的空间尺度也存在几个数量级的差异,如果要考虑各种细节,则会给仿真带来了极大的计算量。

国内的国防科技大学、空军工程大学、中国科学院力学所等单位对非平衡等离子体助燃及增强高超声速燃烧等应用领域开展了大量的实验和仿真研究,取得了大量成果。国外普林斯顿大学的团队在等离子体助燃的化学动力学进行了深入研究,提出了一些等离子体助燃仿真模型,探索了多种活性物质在其中的生成反应路径,另外南加州大学^[17,19]、俄亥俄州立大学^[20-21]、美国空军实验室^[17,20] 等美国大学和研究中心也对等离子体助燃实验与仿真做了大量工作。

2.1 非平衡等离子体点火助燃实验

在近些年的等离子体点火助燃领域,对于各种形式的等离子体包括介质阻挡放电、滑动弧、纳秒脉冲放电、微波/激光诱导等离子体在各种类型的动力设备燃烧室(超声速燃烧室、低排放燃烧室)中进行了实验研究,除此之外,等离子体在低热值燃料燃烧、低温火焰、辅助氢燃烧等燃烧技术的新领域中也有应用,后面将分别进行概述。

在超燃冲压发动机燃烧室中的等离子体点火助燃领域,近 10 年有大量的实验成果和创新, Matsubara 等在等离子体炬(plasma torch)点火的基础上利用介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)产生非平衡等离子体来增强点火和燃烧(见图 2)^[22],所使用的 DBD 的平均功率(10 W)要远低于等离子体炬的功率($\sim kW$),耦合 DBD 的点火器表现出更加优秀的点火性能,并且发现 DBD 对于高功率等离子体炬下剧烈的燃烧反应

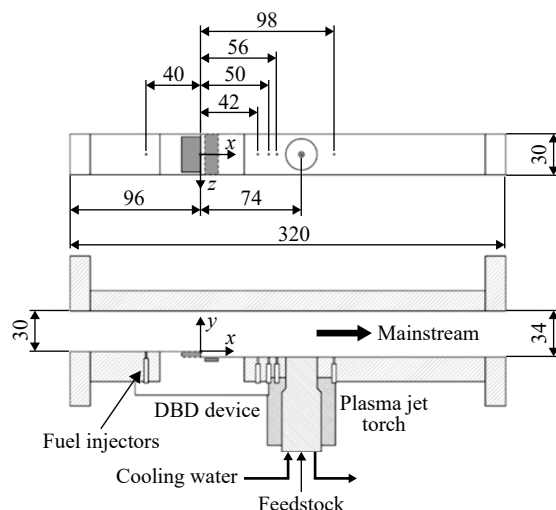


图 2 等离子体炬混合介质阻挡放电^[22](单位: mm)

Fig. 2 Plasma torch mix with dielectric barrier discharge^[22] (unit: mm)

几乎没有作用,而对相对较弱和不稳定的火焰有增强作用。Leonov 等进行了马赫数为 2 条件下的氢气和乙烯的点火燃烧实验,实验采用近直流通等离子体点火结合凹腔火焰稳定器(见图 3(a))^[23],成功进行了点火燃烧,研究了高速气流下等离子体丝的形态以及等离子体对流动场的影响;此后,Leonov 等取消了凹腔火焰稳定器,对横向放电的点火和火焰稳定的效果进行了实验研究^[24],在图 3(b)的电极分布下,实现了氢气和乙烯在平面壁上的点火和火焰稳定,并且发现在实验中火焰稳定效果主要取决于放电的功率,放电功率越高火焰越短,但在放电关闭后火焰熄灭,无法继续燃烧(图中 P_1 、 P_2 、 P_3 等为压力测点, C 为电感, R_a 、 R_b 、 R_c 为电阻); Savelkin 等将高压电极放置在燃料喷射孔内,能在流场中形成复杂的丝状等离子体,称为等离子体-射流单元(plasma-injection module, PIM),具体结构图如图 3(c)所示^[25],等离子体丝跟随燃料射流向下游延伸,强化了燃料-空气掺混,在实验中证明了这种新的构型对于稳定火焰有很大帮助; Leonov 等后续对 PIM 中等离子体形态以及等离子体-燃料射流相互作用进行了更深入的研究,发现等离子体丝会随着射流同时向下发展^[26],形成复杂的涡结构,并且由于等离子体自身的不稳定性,等离子体丝会不断变换位置,能形成更大的影响区域,有利于点火和组织燃烧;最近的研究中,Leonov 等使用了高电压的点电极-接地的条状电极(见图 3(d),图中 K2、K3、K4 为压力传感器),形成三条放电电弧丝,用于改善凹

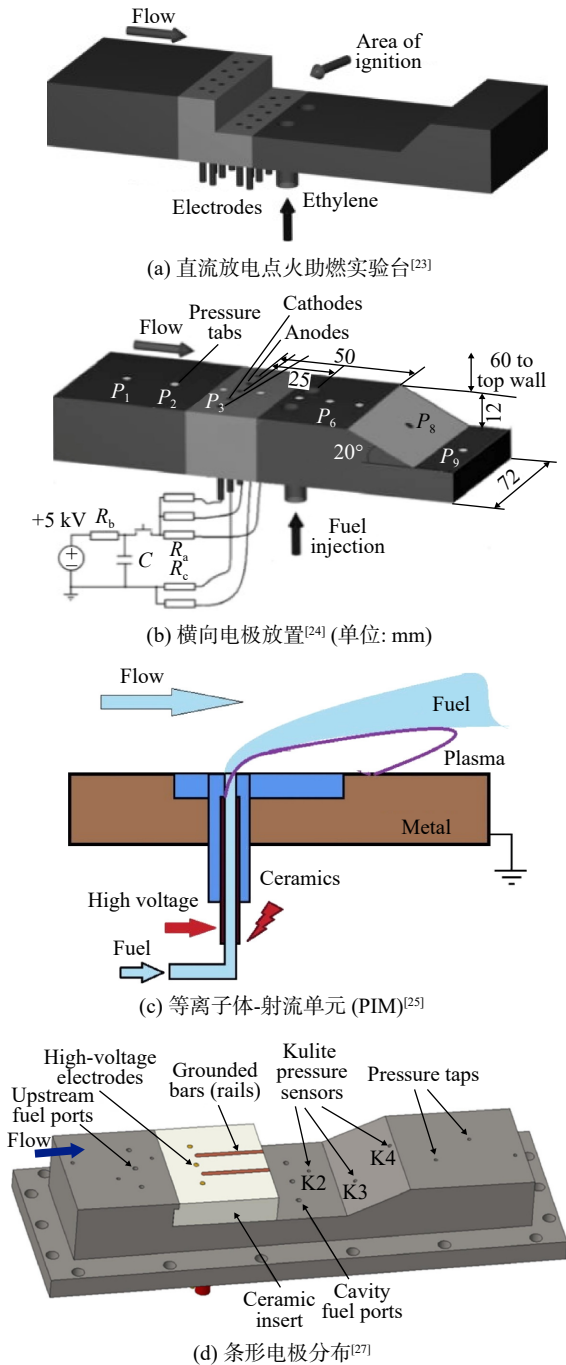


图 3 超燃实验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of supersonic combustion experimental platform

腔上方流动和燃料掺混, 实验中观察到了三种不同的燃烧模态(combustion modes), 发现这种轨道式的放电电极相对于 PIM 更有利于凹腔内以及凹腔上方的燃烧, 增强火焰稳定性, 并且还有着较低的临界点火功率^[27]。

在目前的航空发动机研究领域, 更低污染、更低噪声、更高效、更宽范围稳定工作的发动机始终是追求的方向, 非平衡等离子体能提高火焰

稳定性、拓宽燃烧的贫油熄火边界和吹熄边界、促进燃料充分燃烧降低排放, 而在高压情况下的效果有所减弱。Sabatino 等在最近的研究中比较了纳秒放电不同模式提高火焰稳定性和吹熄极限的效果^[28], 验证高压环境下纳秒放电的强化作用, 同时, 发现在高压下辉光放电比火花放电的强化效果更好。对于燃烧不稳定的控制, Lacoste 等研究了纳秒脉冲放电对钝体稳定贫油弱湍流火焰的影响, 发现等离子体明显降低火焰长度, 改变火焰稳定结构(见图 4)^[29]; 后续 Lacoste 等就关于贫油预混旋流火焰对纳秒脉冲放电的动态响应进行了研究, 发现等离子体降低了火焰传递函数的增益, 可以用于热声不稳定性的控制, 在等离子体作用下速度脉动幅值(见图 5)和压力振荡幅值明显降低^[30]; Lacoste 等在最近的工作中又对纳秒脉冲放电等离子体作用下 V 形和 M 形层流预混火焰的传递函数、热释放率等动态响应特性进行研究^[31], 发现火焰对单个脉冲并不敏感, 其响应特性与放电的平均功率密切相关。对于降低排放和提高燃烧效率, Cha 等在 C_3H_8 扩散火焰中应用 DBD 研究了其对火焰和碳烟生成的影响, 如图 6 所示, 随着放电电压的提高, 火焰长度减少, 同时碳烟显示的明黄色也随之消失^[15], Varella 等进行了滑弧辅助富油燃烧的燃烧实验,

图 4 贫油预混 CH_4 -空气旋流火焰(蓝色)和纳秒脉冲放电(紫色)图片^[29]Fig. 4 Photographic representation of the burner with a lean premixed CH_4 -air swirl-stabilized flame (blue) and nanosecond repetitively pulsed discharges (purple)^[29]

研究表明等离子体的强化学效应促进了燃料的快速氧化离解, 降低了未燃碳氢和 CO 的排放, 却增加了 H_2 和 NO_x 的排放^[32]。

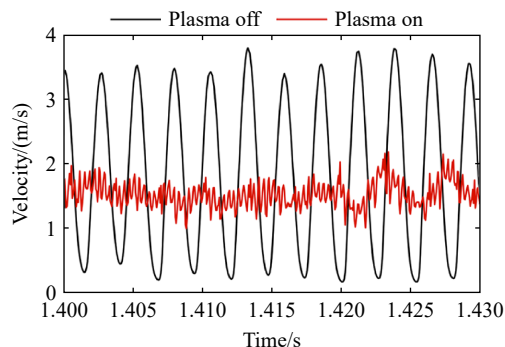


图 5 热线风速仪测得的速度脉动^[29]

Fig. 5 Velocity measured by the hot wire^[29]

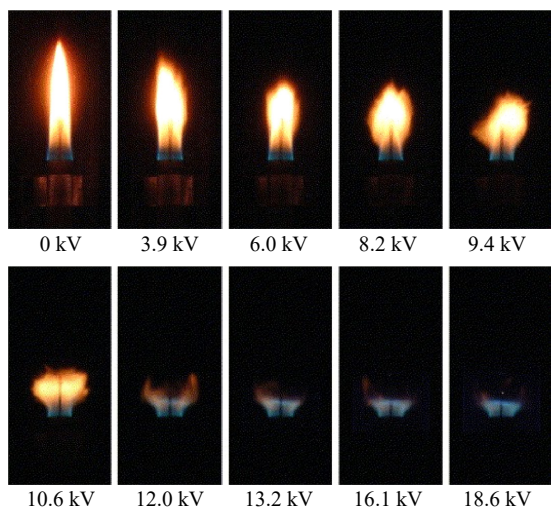


图 6 改变施加电压数码相机拍摄 0.5 s 曝光后的火焰图像^[15]

Fig. 6 Flame images taken by digital camera with 0.5 s exposure by varying applied voltage^[15]

普林斯顿大学谿治光团队在等离子体点火助燃领域工作突出、成果显著, 特别是在燃烧基础的研究。基于对冲火焰实验台^[33], 应用多种先进激光诊断手段, Sun 等研究了纳秒脉冲放电非平衡等离子体对甲烷扩散火熄火极限的影响(见图 7)^[34], 实验通过测量表明等离子体产生的原子 O 浓度随着脉冲重复频率提高而提高, 原子 O 带来的动力学效应明显增强了燃烧反应, 增强了火焰稳定性, 提高了熄火极限; Sun 等还研究了甲烷/氧气/氮气逆流火焰在纳秒脉冲放电下的点熄火性能和 S 曲线的转变^[35], 在较高氧气质量分数下观察到了没有滞后的点火熄火曲线(见图 8, 图中 m_o 为氧气的质量分数, AU 为 absorbance unit, 吸光度单位), 经过动力学建模和仿真表明等离子

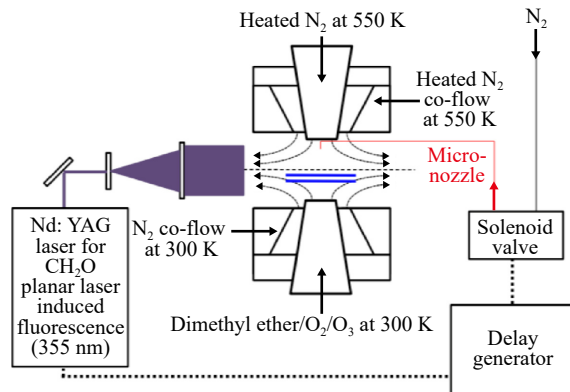


图 7 对冲火焰实验台以及光学诊断手段^[33]

Fig. 7 Schematic of experimental counterflow burner setup and optical diagnostic tools^[33]

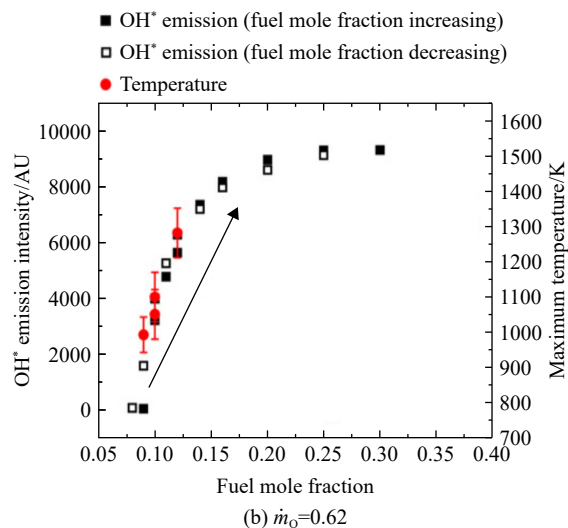
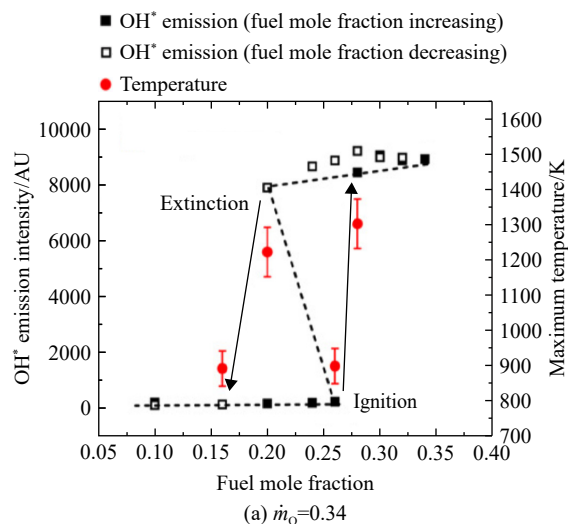


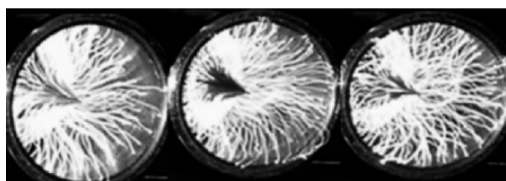
图 8 局部 OH^* 信号强度和局部最高温度与燃料摩尔分数的关系^[35]

Fig. 8 Relationship between OH^* emission intensity, local maximum temperature and fuel mole fraction^[35]

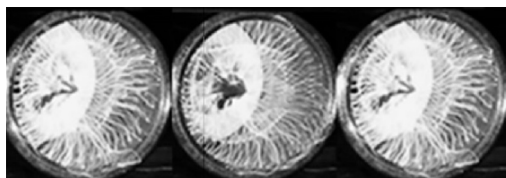
体产生的活性自由基改变了燃料氧化燃烧的动力学路径, 降低了反应活化能并消除了点熄火的

延迟,并且发现等离子体的动力学效应即使在低温下也能进行;同样基于该实验台,Reuter 等采用非平衡等离子体生成臭氧、原子 O 以及转动电子激发态氧分子维持低温火焰,对冷焰吹熄极限、火焰结构和火焰传播速度等一些基本性质进行了研究^[36-37],还研究了冷焰-涡相互作用^[38],以及进行了湍流扩散冷焰的实验和数值仿真研究^[39],与冷焰相关的实验和计算研究在 JU 等的综述中进行了总结^[40]。利用等离子体能提高碳氢燃料燃烧稳定性这一特点,Choe 等在最近的研究中首次对等离子体辅助氨燃烧进行了实验,证明了技术的可行性,并且能够提高氨燃烧的稳定性和降低 NO_x 排放^[41]。

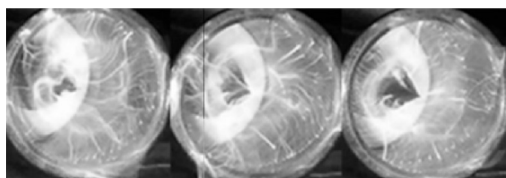
在国内,空军工程大学何立明团队对于航空发动机应用旋转滑弧等离子体点火助燃技术以及新型的激励器构型进行了深入研究,对三维旋转滑弧的放电特性进行了实验研究(见图 9,图中 B-GI、B-GII 和 A-G 的具体定义见原文献)^[42];然后将旋转滑弧应用到航空发动机燃烧室进行了点火助燃实验^[43],是国内首次将等离子体助燃技术用于型号发动机燃烧室(见图 10),该实验结果证明了旋转滑弧助燃条件下燃烧室燃烧效率、出口温度分布、熄火边界等性能得到显著改善;此后还针对该应用场景,对等离子体激励器构型、布置进行了优化设计(见图 11)^[44],基于该发动机燃



(a) B-GI电弧模式



(b) B-GII电弧模式



(c) A-G电弧模式

图 9 助燃激励器放电图^[42]

Fig. 9 The effect picture of the fuel actuator^[42]

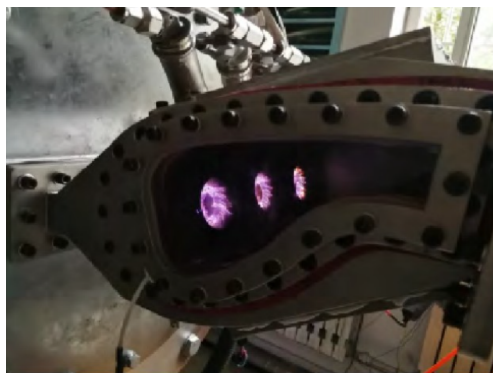


图 10 三燃烧室头部旋转滑弧放电等离子体示意图^[43]

Fig. 10 Discharge display of triple gliding arc plasma-enhanced combustion domes^[43]

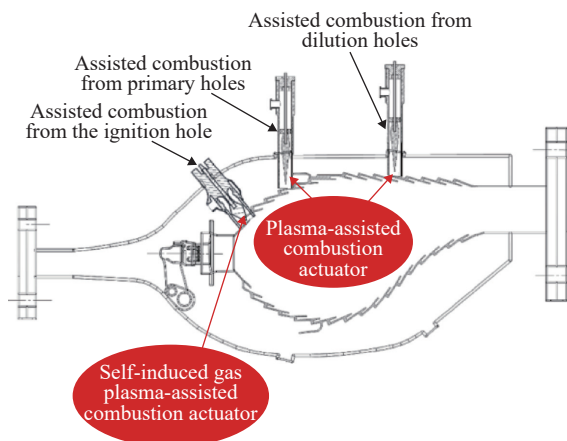


图 11 等离子体激励器布置^[44]

Fig. 11 Installation of plasma actuators^[44]

烧室实验台,进行了 DBD 辅助点火燃烧的实验(见图 12~图 13)^[45]。

国防科技大学的 Yang 等成功地在马赫数为 2.5 的超燃冲压发动机中实现了激光诱导点火^[46],结果表明提高输入激光的能量可以增加初始火核大小以及缩短点火延迟时间,不同点火能量下的火核发展如图 14 所示;而后又应用双脉冲激光成

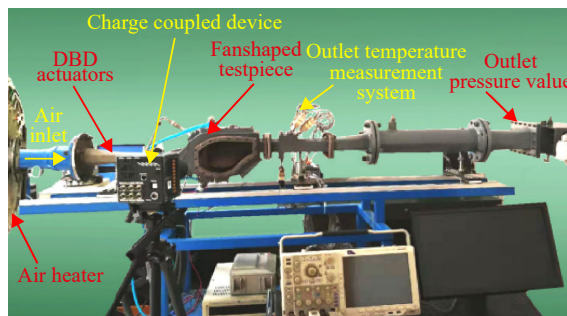
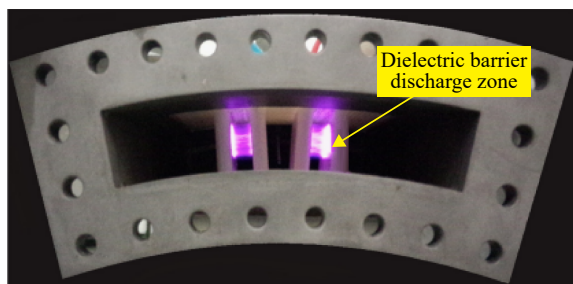
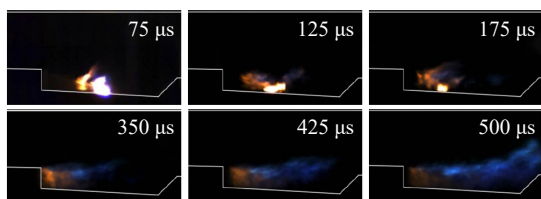
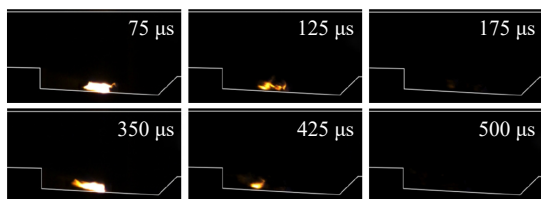


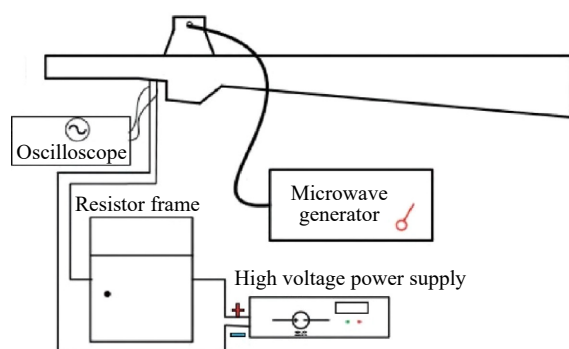
图 12 等离子体助燃实验台^[45]

Fig. 12 Experimental platform of the plasma-assisted combustion^[45]

图 13 DBD 激励器放电^[45]Fig. 13 Discharge display of DBD plasma actuator^[45](a) $\Delta t_2 = 50 \mu s$ (b) $\Delta t_3 = 275 \mu s$ 图 14 不同点火能量下火核发展^[46]Fig. 14 Development of kernel at different ignition energies^[46]

功地进行点火,降低了单脉冲能量,优化了脉冲间隔,提高适用性^[47]。与激光诱导等离子体相比,微波诱导等离子体则能实现更大面积的点火,这两种等离子体均能促进点火燃烧,但是对稳定火焰的贡献很少,在实际应用中可能还需要火焰稳定器的设计,或者耦合用于稳定火焰的等离子体。中国科学院力学所的孟宇等进行了微波增强滑弧等离子体辅助超燃的实验研究,采用滑弧产生等离子体然后微波增强的结合方式,装置图如图 15 所示,以较低能耗达到了单一的高功率滑弧或微波等离子体的助燃效果^[48]。航天工程大学的周思引等通过 DBD 产生非平衡氧等离子体,研究其对甲烷扩散火焰的影响^[49],实验结果显示氧气放电有着明显的气动效应,使得射流角幅度更大,促进了掺混,对于各种工况(贫燃、富燃)等离子体均促进了燃烧增强了释热,并且燃料流量越大效果越好。

除了上述具有代表性的研究,还有很多关于等离子体点火助燃的实验,这些工作均表明,非平衡等离子体通过热效应和动力学效应促进点火增强燃烧,降低点火延迟时间,提高火焰传播速



(a) 微波和滑弧设备示意图



(b) 电极和凹控

图 15 微波增强滑弧等离子体助燃实验示意图^[48]Fig. 15 Schematic diagram of microwave enhanced gliding arc plasma assisted combustion^[48]

度,拓宽贫燃极限,增强燃烧稳定性,提高燃烧室性能和稳定工作范围,降低污染物排放,还能辅助低温火焰进行燃烧学基础研究,增强低热值燃料的点火燃烧,提高氨等燃烧不稳定燃料的火焰稳定性等,并可以用于燃烧室的主动控制,提高燃烧室性能。非平衡等离子体带来的效果是多方面的,比如热效应、自由基团、燃料重整、离子风等,强化点火燃烧的效果是多种机制共同作用的结果,可以结合不同等离子体的特点,充分利用不同等离子体的优势,发展非平衡-平衡等离子体或者多种非平衡等离子体的混合放电,最大化点火助燃效果,例如等离子体炬耦合 DBD、滑动弧点火微波强化、火花塞点火微波强化等多种放电形式组合的方式进行设计,在不同流动环境下,不同形式和不同放电模式的等离子体的作用效果是存在差异的,在实验中应更真实地模拟发动机燃烧室环境进行实验,针对具体应用场景进行设计。

2.2 非平衡等离子体点火助燃诊断

深入等离子体点火助燃的过程研究是理解等离子体点火助燃动力学过程、进行仿真计算以及建立模型的重要过程,对于等离子体点火助燃的

诊断,一方面要对等离子体性质比如电子数密度、电子温度和放电参数进行测量;另一方面要对等离子体激发燃料和氧分子以及电离产生的高能活性粒子进行诊断。与燃烧诊断不同的是等离子体放电过程时间尺度极短,非定常以及伴随着强电磁场,对诊断技术时空分辨率有着较高要求,燃烧诊断中常使用的如热电偶在等离子体诊断中就不适用,因此在等离子体诊断领域激光诊断技术是较为常见的,例如瑞利散射、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)、激光诱导荧光(LIF)、发射光谱、吸收光谱等。

利用等离子体特性(电场强度、电子温度)的测量,计算折合电场强度(电场强度与电子密度比 E/N)作为表征电子能量的关键参数。对于电场强度的测量, Gavrilenko 等^[50]首次报道了静电场下激光诱导 H_2 分子红外辐射的研究,发现其与电场强度的二次方成正比,基于此, Yatom 等应用 H_2 -CARS 进行了纳秒 H_2 等离子体电场测量^[51],原理示意图见图 16,图中各符号含义参见原文献,计算公式如下:

$$E = C \sqrt{\frac{I_{ir}}{I_{cars}} I_p}$$

其中 I_{ir} 是由电场引起的红外光强度, I_{cars} 是 CARS 信号强度, I_p 是泵浦光强度, C 为常数,取决于实验条件。对于大气等离子体的测量, Ito 等首次应用 N_2 分子相干拉曼散射测量电场的方法(见图 17)^[52];在 H_2 -CARS 的基础上 Lempert 等又发展了 N_2 -CARS 测量技术^[53]。对于电子密度的测量, Crintea 等^[54]和 Roettgen 等^[55]应用 Thomson 散射技术测量了微秒放电等离子体的电子温度和密度(见图 18),但由于其设备复杂和信号强度低,在高电子密度的情况下应用斯塔克展宽技术和发射光谱技术^[56]是不错的替代手段。

对于等离子体产生的活性粒子的测量,激光诱导荧光(LIF)是最为常用的诊断技术,在长期以来的应用和发展下技术及其数据处理方法相对成熟,不仅能测定特定活性分子的实时变化,还能

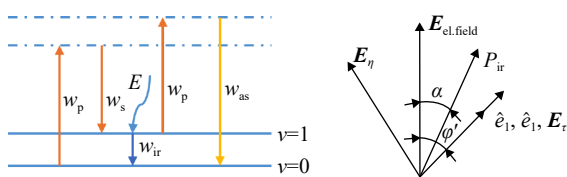


图 16 CARS 测电场强度的原理图^[51]

Fig. 16 Principle of CARS for measuring electric field^[51]

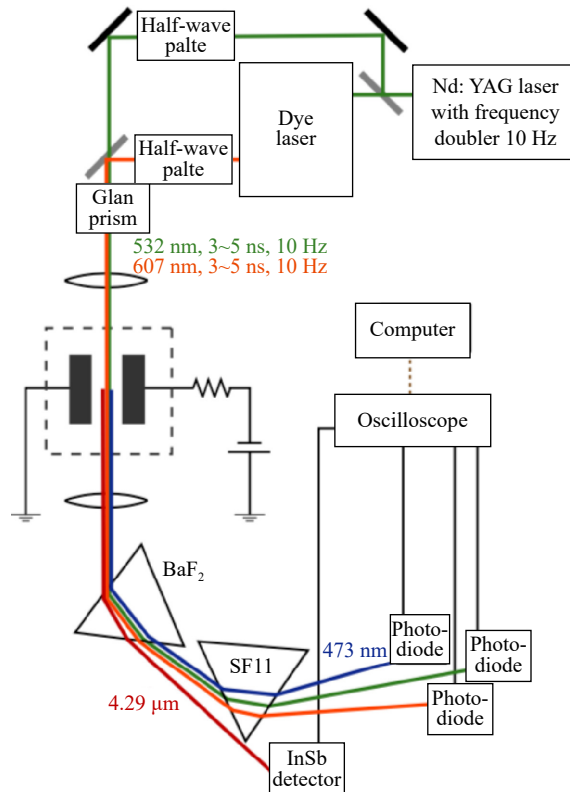
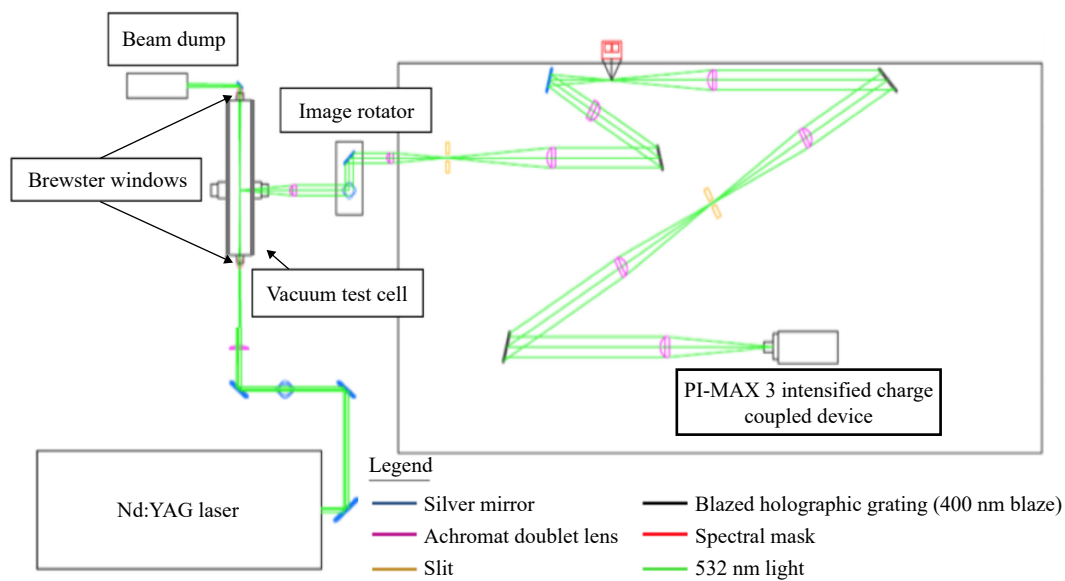
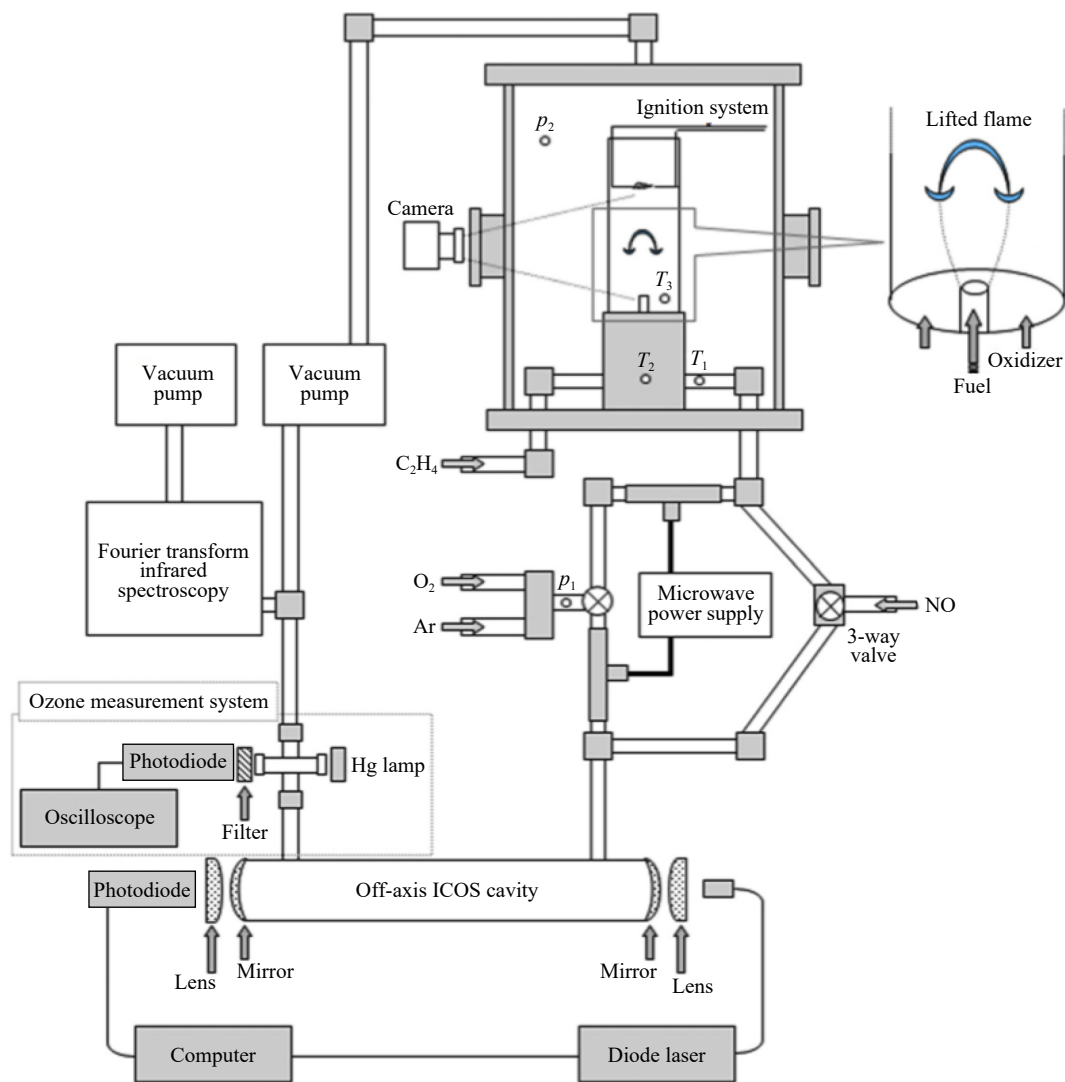


图 17 相干拉曼散射电场测量系统示意图^[52]

Fig. 17 Schematic diagram of coherent Raman scattering electric field measurement system^[52]

测定其激发态从而计算出对应温度。电离 O_2 生成大量的原子 O, 在低温高压环境下原子 O 重新和激发态 $O_2(O_2(a^1\Delta_g))$ 结合生成 O_3 , O_3 在环境中存留时间长, 有着较强的氧化性, 能有效强化燃烧, 在 Ombrello 等对 O_3 ^[57] 和 $O_2(a^1\Delta_g)$ ^[58] 助燃的动力学研究中分别通过吸收光谱和积分腔输出光谱(ICOS)的方法对浓度进行了定量测量, 图 19 为其装置示意图(图中 T 为温度, p 为压力)。原子 O 在等离子体助燃中尤其是高温下起着关键作用, 其浓度可以应用双光子吸收激光诱导荧光(TALIF)技术进行测量, 详细的理论和计算公式在 Niemi 等的文献中有推导^[59], SUN 等^[34]在实验中应用 TALIF 技术对原子 O 浓度进行了测量, 如图 20 为 TALIF 原子 O 测量的示意图, 图 21 为测量结果, 发现原子 O 浓度随放电重复频率提高而增加, 另将测得结果带入数值模拟中发现存在一临界温度, 低温时等离子体主要以热效应为主, 高温时原子 O 才体现出更为复杂的反应动力学强化作用, YIN 等用与原子 O 测量方法相同的 TALIF 测量了原子 H 的浓度^[60]。

CH^* 作为燃烧反应中的重要中间物可以表示火焰前沿的位置, 在实验中往往对其自发光进行

图 18 Thomson 散射技术示意图^[55]Fig. 18 Schematic of Thomson scattering technique^[55]图 19 实验和 ICOS 诊断系统^[58]Fig. 19 Experimental system and ICOS diagnostic system^[58]

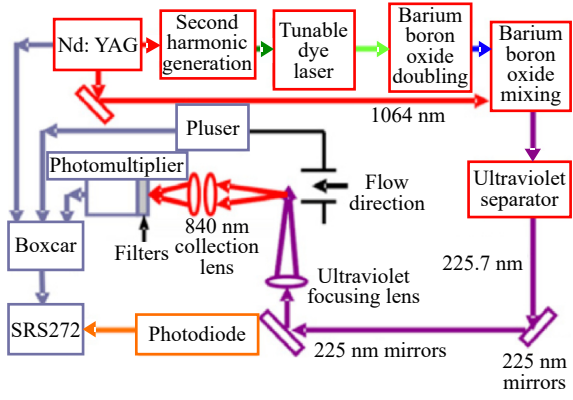


图 20 TALIF 原子 O 测量^[34]

Fig. 20 TALIF for atomic O measurements^[34]

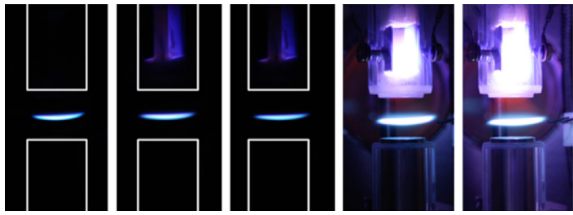


图 21 原子 O 测量结果图^[34]

Fig. 21 Results of atomic O measurements^[34]

增强成像; OH 可以用来表示燃烧反应区位置, 实验中常用 OH 平面激光诱导荧光(PLIF)对其进行定量测量, 在 Lacoste 等对钝体稳定火焰对纳秒脉冲等离子体的响应研究、Nikolay 等对不同燃料的纳秒脉冲点火实验、YIN 等的 LIF 测温^[61]和 H₂ 点火实验^[62]、Do 等^[10]和 Wu 等的超声速点火^[63]和火焰稳定实验等研究中也应用了 OH LIF 诊断技术; 为进行等离子体助燃的低温特性和冷焰的相关研究, CH₂O 代替了 OH 成为低温燃烧反应区重要的标识分子^[64], 不过由于猝灭速率随温度、压力变化大而应用 PLIF 对其进行定量测量难度较大^[65], 一般更常使用中红外吸收光谱技术(mid-IR)进行测量, 同时 mid-IR 技术还可以对 HO₂、CH₄ 和 C₂H₂ 等分子进行定量测量^[66]。诊断技术相关内容在表 1 进行了总结。

上述的先进激光诊断技术, 对等离子体产生的流场扰动以及等离子体作用下的火核发展、火焰传播、火焰稳定可以提供一个直观的认识。Wolk 等^[9]在定容燃烧室内进行了微波辅助点火的实验, 在实验中应用高速纹影对不同条件下点火燃烧情况进行了成像(见图 22, 图中 φ 为当量比), 记录了火焰大小和发展, 并计算了点火延迟时间和火焰传播速度。相对来说, 诊断技术本身的发展并不快, 近些年在数据采集、多参数测量

表 1 等离子体助燃中应用主要测量内容和技术

Table 1 Main measurements and techniques applied in plasma-assisted combustion

测量	使用技术	激发光波长/nm	探测光波长/nm
原子 O	TALIF	226	834.91
OH	PLIF	283	315
CH*	自发光		430
O ₃	吸收光谱	253.7	
O ₂ (a ¹ Δg)	积分腔输出光谱	1 505	
原子 H	TALIF	205	656
CH ₂ O	PLIF	355	
CH ₂ O	mid-IR	7 000	
HO ₂	法拉第旋转光谱	7 100	
温度	瑞利散射	532	532
温度	CARS		
电子密度	发射光谱(OES)/斯塔克增宽(Stark broadening)		
电子温度	Thomson 散射		
电场强度	H ₂ /N ₂ CARS		

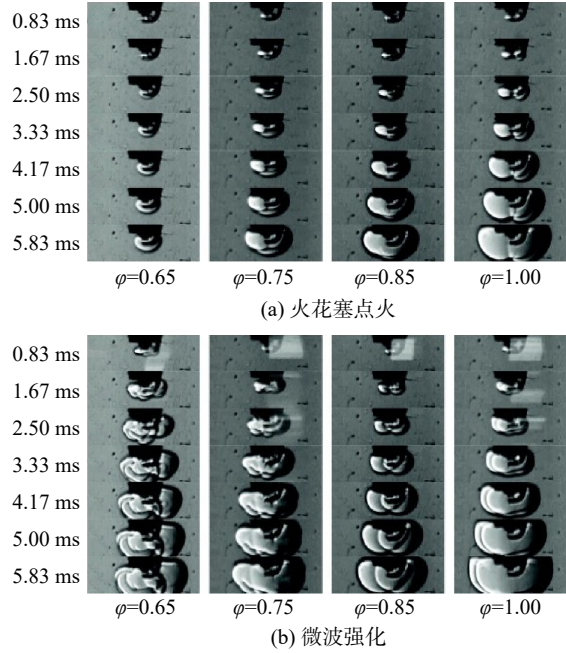


图 22 火花塞点火和微波强化下点火的纹影图^[9]

Fig. 22 Schlieren images of spark ignition and spark ignition with microwave enhancement^[9]

等方法上有所创新, 基本原理方法都相同。实验中诊断技术是获取数据和物理场信息的基本手段, 是洞悉理解等离子体点火助燃动力学路线的关键, 随着诊断技术的发展和运用, 等离子体模型和仿真技术也会更全面、准确。

2.3 非平衡等离子体点火助燃仿真

采用纯实验手段进行研究存在一定的局限性, 对等离子体助燃的动力学机理揭示能力有限, 目前的实验研究主要关注实验现象, 缺乏深入理论机理的探索, 仿真计算可以为深入理解等离子体点火助燃机理、提高等离子体激励器设计以及燃烧室总体设计、提高点火助燃效果提供理论指导和帮助。等离子体点火助燃的仿真思路主要分为三个方面: ①对等离子体进行仿真, 主要关注等离子体本身的特性, 建立气体放电模型; ②将等离子体产生的热效应或者自由基作为源项带入仿真, 研究等离子体作用时火焰延迟时间、点火极限等性质; ③先对等离子体放电进行仿真, 再将得到的结果作为初始条件带入到燃烧仿真中。经过前几节的分析, 等离子体点火助燃涉及热效应、化学反应、粒子间的碰撞、电磁场下的带电粒子运动, 过程非常复杂, 还需要考虑等离子体与流场相互作用带来的输运效应以及放电产生的声学等效应, 另外对于大分子燃料的激发、离解等的作用机理则会更加复杂, 总体而言, 等离子体助燃的仿真技术仍有巨大的研究发展空间。

在近 10 年来, 等离子体放电的不同活性产物对点火燃烧性能的影响被广泛研究, 一系列实验和理论研究证明了等离子体产生原子 O 加速各种燃料氧化的关键作用^[67-70], 逐渐建立起了原子 O 的生成路径和反应路径, 此外, 以往和近期的一些研究也对空气放电等离子体的常见产物如 $O_2(a^1\Delta_g)$ ^[58,71]、 O_3 ^[57,72-73] 和 NO_x ^[74-75] 等对不同燃料点火燃烧性能的影响进行了深入讨论和实验验证, 也建立了这些粒子的生成和参与燃料反应的路径。以普林斯顿大学、斯坦福大学、南加州大学为代表的美国大学在燃烧动力学领域有着丰富经验和成果, 开发了不同环境下适用的燃烧动力学反应模型, 如 USC (University of Southern California) Mech II、GRI (Gas Research Institute) Mech、HP Mech, 基于现有燃烧模型和放电等离子体模型, Adamovich 等加入了燃料离解、粒子碰撞等过程, 针对 CH_4/Air 、 C_2H_4/Air 在纳秒脉冲放电下的点火实验进行了建模仿真^[76], 仿真预测结果与实验测得的点火延迟时间吻合较好; 之后 SUN 等在该模型的基础上, 对 He、Ar 环境下的 CH_4 燃烧的基元反应进行了分析建模^[72]; 另外 Sun 等的实验和计算验证了该模型在合适环境下的可用性^[67]。

在模型建立的过程中也能指导实验创新, 图 23

展示了不同折合场强下电场能量的走向, 燃料和氧化剂分子的激发态情况不同, 低场强(直流)下以激发燃料分子和氧分子的转动激发态为主; 高场强(纳秒脉冲放电)下以全电离的高能粒子为主。基于此 MAO 等建立了直流-纳秒混合放电的模型仿真^[77], 在合适的放电参数设置下混合放电助燃效果明显优于单独纳秒放电或直流放电。图 24 为混合放电示意图, 混合放电下 $O_2(a^1\Delta_g)$ 生成率高, 通过一系列反应实现燃烧动力学强化, 另外转动激发态燃料分子 $CH_4(v)$ ($H_2(v)$) 和 $O_2(v)$ 的热效应对点火助燃强化也有一定贡献。

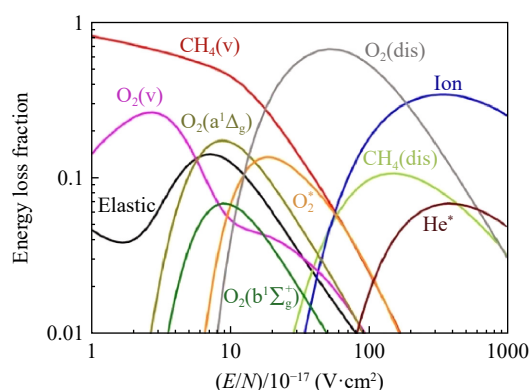


图 23 不同 E/N 各分子自由度的能量分数
($0.083CH_4/0.167O_2/0.75He$)^[77]

Fig. 23 Energy fractions deposited into different molecular degrees of freedom at different E/N
($0.083CH_4/0.167O_2/0.75He$)^[77]

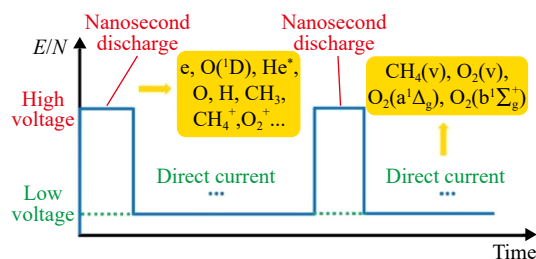


图 24 纳秒脉冲-直流混合放电示意图^[77]

Fig. 24 Schematic of the hybrid repetitively-pulsed nanosecond discharge and direct current discharge^[77]

详细的等离子体助燃动力学机制包含大量的粒子种类和反应式, 需要大量的支撑数据, 虽然可以做到一定的细节, 但要对实际应用中多维非稳定非平衡等离子体助燃进行仿真, 需要的计算量是惊人的, Bellemans 等提出了一种简化的基于主成分分析的模型, 简化模型的计算结果仍能保证准确性^[78], 基于等离子体放电的能量分布特性, 提出 P-DRGEP 方法 (plasma-specific extension

to the directed relation graph with error propagation method)^[79], 在对超燃纳秒放电辅助乙烯-空气燃烧的仿真计算中, 应用该方法生成了包含 54 种主要组分、236 个主要反应的计算机制, 能大大提高计算仿真速度, 图 25 为计算简化前后的对比(图中 τ_{ig} 为点火时间, $\tau_{ig,det}$ 为未经简化计算的点火时间, T_0 为初始温度, S_l 为火焰传播速度, $S_{l,det}$ 为未经简化计算的火焰传播速度), 说明简化计算能保证各个过程的误差限制在一定范围内。

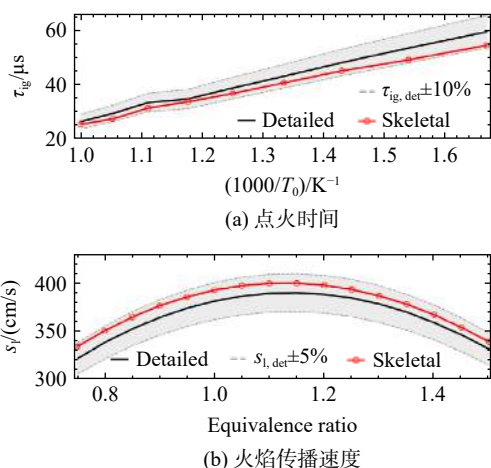


图 25 计算机制简化前后结果对比^[79]

Fig. 25 Comparison of detailed and skeletal mechanism^[79]

针等离子体辅助点火燃烧的一系列关键基础问题进行了仿真实验研究, 哈尔滨工程大学郑洪涛等探究了等离子体点火器对低热值燃料的点火性能^[80], 使用简化的 GRI(Gas Research Institute) 3.0 反应机理和 EDC(eddy dissipation concept) 燃烧模型, 将活性原子 O 和热效应作为等离子体主要作用带入计算, 对点火和火焰传播过程进行了仿真, 结果表明原子 O 的加入能够降低临界点火功率和点火延迟时间, 较相同条件下的常规点火功率降低了 90%, 另外提高点火功率可以进一步缩短点火延迟时间。游滨川等研究了燃料重整对环管燃烧室燃烧特性的影响^[81], 发现采用 DBD 等离子体协同催化剂技术能有效提高甲烷转化率, 从而提高燃气轮机的循环热效率, 结果表明重整燃料富含水蒸气, 在增加了回流区速度的同时, 降低了高温区的温度, 有助于降低燃烧室组织燃烧, 并且使热力型和快速性 NOx 排放降低了一个数量级。杨锐等建立了滑动弧裂解 CO₂ 的反应机理模型^[82], 计算结果表明滑动弧裂解 CO₂ 生成大量原子 O 和 O₂ 等活性分子, 进而可以改善低热值燃料的燃烧性能, 主要机制中 $e + CO_2 \rightarrow$

$e + CO + O$ 的贡献最大, 并且电子数密度越大电子温度越高, CO₂ 的转化率越高。余涛等对射流等离子体在常压下的形态发展进行了数值模拟研究^[83], 仿真中耦合了等离子体产生的电磁场、温度场及速度场的计算, 得到了放电等离子体电弧的温度场和速度场分布情况。

总结模型建立的过程, 一个准确的计算模型的建立需要先进的诊断技术、大量基础实验和数据的积累以及精巧的实验设计, 俄罗斯、美国的一些高校和研究所在基础燃烧研究领域经验丰富、基础雄厚, 在实验设计上有一定的先进性, 在等离子体助燃相关领域的基础研究上往往走在国际前列, 国内相对来说基础研究设备设施普及不够, 能够进行先进激光诊断的实验室屈指可数, 还需要加大投入、加强发展。

3 总结与讨论

非平衡等离子体作为极具前景的强化和组织点火、燃烧的技术手段, 在实验上已经有较为广泛的研究和验证, 证明了非平衡等离子体对点火燃烧有明显的加强, 这些研究为非平衡等离子体点火助燃技术的实际应用奠定了坚实的基础。总结近 10 年在等离子体点火助燃领域的研究, 非平衡等离子体的应用主要体现如下: ①能降低点火延迟时间, 拓宽点火燃烧边界、吹熄边界, 能在极端恶劣环境下有效地组织燃烧, 可以为高性能军用航空发动机、超燃冲压发动机燃烧室设计提供足够宽的稳定工作范围; ②能增强超贫油燃烧以及低温火焰的稳定性, 有助于提高燃烧效率, 降低污染物排放, 为超环保航空发动机的研发提供方案; ③能促进超低热值燃料点火燃烧, 以及提高氨等燃烧不稳定燃料的稳定性, 提高能源利用效率。从实验研究的角度, 结合平衡等离子体和非平衡等离子体优缺点进行混合放电的方法, 以及混合多种放电生成非平衡等离子体的方法比使用单一形式的等离子体带来的效果要好, 给实用化带来了更大的可能性, 但这种混合放电的复杂程度会给仿真、计算以及预测带来很大的不确定性。

在非平衡等离子体激发燃料、氧分子高能激发态, 电离产生的活性粒子、高能电子的先进激光诊断技术和测量工作上也有重大进展, 基本上确定了不同放电参数下激发态情况和电场能量走向, 另基于诊断结果, 也对于各活性粒子(O₃、

$O_2(a^1\Delta_g)$)、高能激发态分子对于燃料燃烧的影响进行了实验研究,建立了各活性粒子的生成反应路径,对等离子体点火助燃的理论研究提供了丰富的数据,对构建等离子体助燃燃烧动力学模型也起到重要作用。为进行深入的理论研究和机理探索,节约实验成本,提高等离子体点火助燃激励器设计和燃烧室总体设计水平,建立模型和进行仿真是不可或缺的,就目前来看,大量的计算和仿真模型并未考虑非平衡放电等离子体带来的电磁场以及等离子体与流场、声场之间的相互作用,进行全要素等离子体点火助燃燃烧室的模拟仿真仍是一个难点问题,如何根据等离子体作用于燃烧的主要物理效应和参与化学反应的重要组分开发专用于等离子体-燃烧的仿真模型也是难度极高的问题。也正是由于等离子体-燃烧仿真的复杂度极高,目前在等离子体点火助燃的实用化道路上仍以实验为主要内容。

这是一个跨学科、跨领域的工程课题,为加快实现等离子体点火助燃技术的工程化应用,还有许多工作要做,还有大量的问题需要解决。首先高效率的等离子体激励器的设计,以及耦合了多种等离子体的电源的设计,应用到不同燃烧室中等离子体激励单元的形式、几何布置、工作参数等还需要更多的实验研究和经验总结,另外还有等离子体带来的电磁兼容的问题需要考虑。

参考文献:

- [1] STARIKOVSKIY A, ALEKSANDROV N. Plasma-assisted ignition and combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2013, 39(1): 61-110.
- [2] STARIKOVSKII A Y. Plasma supported combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2405-2417.
- [3] STARIKOVSKAIA S M. Plasma assisted ignition and combustion[J]. *Journal of Physics:D Applied Physics*, 2006, 39(16): 265-299.
- [4] STARIKOVSKAIA S M, STARIKOVSKII A Y. Plasma-assisted ignition and combustion[M]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, 2010.
- [5] KIM W, SNYDER J, COHEN J. Plasma assisted combustor dynamics control[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3479-3486.
- [6] D'ENTREMONT J, GEJJI R M, VENKATESH P B, et al. Plasma control of combustion instability in a lean direct injection gas turbine combustor[R]. National Harbor, US:52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014.
- [7] CHINTALA N, BAO A, LOU G, et al. Measurements of combustion efficiency in nonequilibrium RF plasma ignited flows[J]. *Combustion and Flame*, 2006, 144(4): 744-756.
- [8] STOCKMAN E S, ZAIDI S H, MILES R B, et al. Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(7): 1453-1461.
- [9] WOLK B, DEFILIPPO A, CHEN J Y, 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.
- [10] DO H, IM R K, CAPPELLI R A, et al. Plasma assisted flame ignition of supersonic flows over a flat wall[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(12): 2298-2305.
- [11] BARBOSA S, PILLA G, LACOSTE D, et al. Influence of a repetitively pulsed plasma on the flame stability domain of a lab-scale gas turbine combustor[R]. Vienna, Australia: Fourth European Combustion Meeting, 2009.
- [12] LEFKOWITZ J K, JU Yiguang, STEVENS C A, et al. The effects of repetitively pulsed nanosecond discharges on ignition time in a pulsed detonation engine[R]. San Jose, US:49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2013.
- [13] LEE D H, KIM K T, KANG H S, et al. Plasma-assisted combustion technology for NOx reduction in industrial burners[J]. *Environmental Science and Technology*, 2013, 47(19): 10964-10970.
- [14] BRIESCHENK S, O'BYRNE S, KLEINE H. Laser-induced plasma ignition studies in a model scramjet engine[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(1): 145-148.
- [15] CHA M S, LEE S M, KIM K T, et al. Soot suppression by nonthermal plasma in co-flow jet diffusion flames using a dielectric barrier discharge[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 141(4): 438-447.
- [16] SONG Chonglin, BIN Feng, TAO Zemin, et al. Simultaneous removals of NOx, HC and PM from diesel exhaust emissions by dielectric barrier discharges[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 166(1): 523-530.
- [17] JU Yiguang, SUN Wenting. Plasma assisted combustion:dynamics and chemistry[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 48: 21-83.
- [18] CHEN Z, JU Y. Theoretical analysis of the evolution from ignition kernel to flame ball and planar flame[J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2007, 11(3): 427-453.
- [19] LEMPERT W R. An overview of the AFOSR plasma MURI program:fundamental mechanisms, predictive modeling, and novel aerospace applications of plasma assisted combustion[R]. Kissimmee, US:53rd AIAA Aerospace Science Meeting, 2015.
- [20] ADAMOVICH I, BAALRUD S D, BOGAERTS A, et al. The 2017 plasma roadmap:low-temperature plasma science and technology[J]. *Journal of Physics:D Applied Physics*, 2017, 50(32): 1-47.
- [21] WANG Hai, YOU Xiaoqing, AMEYA V J, et al. USC Mech version II :high-temperature combustion reaction model of $H_2/CO/C_1-C_4$ compounds[EB/OL]. [2022-08-15]. http://ignis.usc.edu/Mechanisms/USC-Mech%20II/USC_Mech%20II.htm.
- [22] MATSUBARA Y, TAKITA K, MASUYA G. Combustion enhancement in a supersonic flow by simultaneous operation of DBD and plasma jet[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3287-3294.
- [23] LEONOV S B, YARANTSEV D A, NAPARTOVICH A P, et al. Plasma-assisted combustion of gaseous fuel in supersonic duct[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34: 2514-2525.
- [24] LEONOV S B, YARANTSEV D A, CARTER C. Experiments on electrically controlled flameholding on a plane wall in a supersonic airflow[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 289-294.
- [25] SAVELKIN K V, YARANTSEV D A, ADAMOVICH I V, et al. Ignition and flameholding in a supersonic combustor by an electrical discharge combined with a fuel injector[J]. *Combustion and Flame*, 2015, 162(3): 825-835.

- [26] LEONOV S B, HEDLUND B, HOUP T A. Morphology of quasi-direct-current discharges collocated with fuel jets in a supersonic crossflow[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2020, 36(16): 1-9.
- [27] LEONOV S B, ELLIOTT S, CARTER C, et al. Modes of plasma-stabilized combustion in cavity-based $M = 2$ configuration[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 124(14): 110355.1-110355.15.
- [28] SABATINO F D, LACOSTE D A. Enhancement of the lean stability and blow-off limits of methane-air swirl flames at elevated pressures by nanosecond repetitively pulsed discharges[J]. *Journal of Physics:D Applied Physics*, 2020, 53(35): 355201.1-355201.8.
- [29] LACOSTE D A, XU D A, MERCK J P, et al. Dynamic response of a weakly turbulent lean-premixed flame to nanosecond repetitively pulsed discharges[J]. *Proceedings Combustion Institute*, 2013, 34(2): 3259-3266.
- [30] LACOSTE D A, MOECK J P, DUROX D, et al. Effect of nanosecond repetitively pulsed discharges on the dynamics of a swirl-stabilized lean premixed flame[R]. San Antonio, US:ASME Turbo Expo:Turbine Technical Conference and Exposition, 2013.
- [31] LACOSTE D A, MOECK J P, ROBERTS W L, et al. Analysis of the step responses of laminar premixed flames to forcing by non-thermal plasma[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4145-4153.
- [32] VARELLA R A, SAGÁS J C, MARTINS C A. Effects of plasma-assisted combustion on pollutant emissions of a premixed flame of natural gas and air[J]. *Fuel*, 2016, 184: 269-276.
- [33] SUN Wenting, OMBRELLO T, WON S H, et al. Effects of non-equilibrium plasma on counterflow diffusion flames[R]. Orlando, US:48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2010.
- [34] SUN Wenting, UDDI M, OMBRELLO T, et al. Effects of non-equilibrium plasma discharge on counterflow diffusion flame extinction[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3211-3218.
- [35] SUN Wenting, WON S H, JU Yiguang, et al. Direct ignition and s-curve transition by in situ nano-second pulsed discharge in methane/oxygen/helium counterflow flame[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 847-855.
- [36] REUTER C B, WON S H, JU Yiguang. Experimental study of the dynamics and structure of self-sustaining premixed cool flames using a counterflow burner[J]. *Combustion and Flame*, 2016, 166(sup.): 125-132.
- [37] REUTER C B, WON S H, JU Yiguang. Flame structure and ignition limit of partially premixed cool flames in a counterflow burner [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 16(1): 1513-1522.
- [38] REUTER C B, KATTA V R, YEHIA O R, et al. Transient interactions between a premixed double flame and a vortex[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 1851-1859.
- [39] NOVOSELOV A G, REUTER C B, YEHIA O R, et al. Turbulent nonpremixed cool flames: experimental measurements, direct numerical simulation, and manifold-based combustion modeling[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 209: 144-154.
- [40] JU Yiguang, REUTER C B, YEHIA O R, et al. Dynamics of cool flames[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 75: 100787.1-100787.39.
- [41] CHOE J, SUN Wenting, OMBRELLO T, et al. Plasma assisted ammonia combustion: Simultaneous NO_x reduction and flame enhancement[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 228(1): 430-432.
- [42] 费力, 张磊, 何立明, 等. 环境压力对滑动弧放电等离子体助燃激励器特性的影响研究[J]. *高压电器*, 2019, 55(7): 127-134.
- FEI Li, ZHANG Lei, HE Liming, et al. Investigation on the influence of environmental pressure on the gliding arc discharge plasma actuator combustion characteristics[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(7): 127-134. (in Chinese)
- [43] 胡长淮, 何立明, 陈一, 等. 燃烧室头部激励的等离子体强化燃烧特性实验研究[J]. *推进技术*, 2021, 42(12): 2762-2771.
- HU Changhuai, HE Liming, CHEN Yi, et al. Experimental research on characteristics of plasma-enhanced combustion excited by combustor dome[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(12): 2762-2771. (in Chinese)
- [44] FEI Li, ZHAO Bingbing, CHEN Yi, et al. Rotating gliding arc discharge plasma-assisted combustion from ignition hole[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2021, 129: 110473.1-110473.12.
- [45] CHEN Yi, HE Liming, FEI Li, et al. Experimental study of dielectric barrier discharge plasma-assisted combustion in an aero-engine combustor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 99: 105765.1-105765.10.
- [46] YANG Leichao, AN Bin, LI Xipeng, et al. Characterization of successive laser induced plasma ignition in an ethylene fuelled model scramjet engine[R]. Xiamen, China:21st AIAA International Space Planes and Hypersonics Technologies Conference, 2017.
- [47] YANG Leichao, AN Bin, LIANG Jianhan, et al. Dual-pulse laser ignition of ethylene-air mixtures in a supersonic combustor[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 7911-7919.
- [48] 孟宇, 顾洪斌, 孙文明, 等. 微波增强滑移电弧等离子体辅助超声速燃烧[J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 124-131.
- MENG Yu, GU Hongbin, SUN Wenming, et al. Microwave enhanced gliding arc plasma assisted supersonic combustion[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 124-131. (in Chinese)
- [49] 周思引, 聂万胜, 车学科, 等. 非平衡等离子体对甲烷-氧扩散火焰影响的实验研究[J]. *力学学报*, 2019, 51(5): 1336-1349.
- ZHOU Siyin, NIE Wansheng, CHE Xueke, et al. Experiment study of effect of nonequilibrium plasma on methane-oxygen diffusive flame[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(5): 1336-1349. (in Chinese)
- [50] GAVRILENKO V P, KUPRIYANOVA E B, OKOLOKULAK D P, et al. Generation of coherent IR light on a dipole-forbidden molecular transition with biharmonic pumping in a static electric field[J]. *JETP Letters*, 1992, 56: 1-4.
- [51] YATOM S, TSKHAI S, KRASIK Y E. Electric field in a plasma channel in a high-pressure nanosecond discharge in hydrogen: a coherent anti-stokes raman scattering study[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(25): 255001.1-255001.5.
- [52] ITO T, KOBAYASHI K, MUELLER S, et al. Electric field measurement in an atmospheric or higher pressure gas by coherent Raman scattering of nitrogen[J]. *Journal of Physics:D Applied Physics*, 2009, 42(9): 92003-92006.
- [53] LEMPET W R, KEARNEY S P, BARNAT E V. Diagnostic study of four-wave-mixing-based electric-field measurements in high-pressure nitrogen plasmas[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(29): 5688-5694.
- [54] CRINTEA D L, LUGGENHÖLSCHER D, KADETOV V A, et al. Phase-resolved measurement of anisotropic electron velocity distribution functions in a radio-frequency discharge[J]. *Journal of*

- Physics: D Applied Physics, 2008, 41(8): 1577-1582.
- [55] ROETTGEN A M, SHKURENKOV I, ADAMOVICH I V, et al. Thomson scattering studies in He and He/H₂ nanosecond pulse nonequilibrium plasmas[R]. National Harbor, US: 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014.
- [56] SAINCT F P, URABE K, PANNIER E, et al. Electron number density measurements in nanosecond repetitively pulsed discharges in water vapor at atmospheric pressure[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29(2): 025017.1-025017.8.
- [57] OMBRELLO T, WON SH, JU Yiguang, et al. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: part I effects of O₃[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(10): 1906-1915.
- [58] OMBRELLO T, WON SH, JU Yiguang, et al. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: part II effects of O₂ (a¹Δg)[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(10): 1916-1928.
- [59] NIEMI K, GATHEN S V D, DOBELE H F. Absolute atomic oxygen density measurements by two-photon absorption laser-induced fluorescence spectroscopy in an RF-excited atmospheric pressure plasma jet[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2005, 14(2): 375-386.
- [60] YIN Z, ECKERT Z, ADAMOVICH I V, et al. Time-resolved radical species and temperature distributions in an Ar-O₂-H₂ mixture excited by a nanosecond pulse discharge[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3455-3462.
- [61] YIN Z, MONTELLO A, LEMPET W R, et al. Measurements of temperature and hydroxyl radical generation/decay in lean fuel-air mixtures excited by a repetitively pulsed nanosecond discharge[R]. AIAA 2012-3182, 2012.
- [62] YIN Z, ADAMOVICH I V, LEMPET W R. OH radical and temperature measurements during ignition of H₂-air mixtures excited by a repetitively pulsed nanosecond discharge[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2012, 34(2): 3249-3258.
- [63] WU L, LANE J, CERNANSKY N P, et al. Plasma-assisted ignition below self-ignition threshold in methane, ethane, propane, and butane-air mixtures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3219-3224.
- [64] BRACKMANN C, NYGREN J, BAI X, et al. Laser-induced fluorescence of formaldehyde in combustion using third harmonic Nd: YAG laser excitation[J]. *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2003, 59(14): 3347-3356.
- [65] METZ T, BAI Xiao, OSSLER F, et al. Fluorescence lifetimes of formaldehyde (H₂CO) in the $\tilde{A}1A_2 \rightarrow \tilde{X}1A_1$ band system at elevated temperatures and pressures[J]. *Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2004, 60(4): 1043-1053.
- [66] LEFKOWITZ J, WINDOM B C, MACDONALD W, et al. Time dependent measurements of species formation in nanosecond-pulsed plasma discharges in C₂H₄/O₂/Ar mixtures[R]. National Harbor, US: 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014.
- [67] SUN Wenting, UDDI M, SANG H W, et al. Kinetic effects of non-equilibrium plasma-assisted methane oxidation on diffusion flame extinction limits[J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(1): 221-229.
- [68] SHEN Xiaobo, YANG Xuiliang, SANTNER J, et al. Experimental and kinetic studies of acetylene flames at elevated pressures[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(1): 721-728.
- [69] ARIC R, MAO Xingqian, CHEN Q, et al. Kinetic studies and mechanism development of plasma assisted pentane combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2018, 37(4): 5595-5603.
- [70] ZHONG Hongtao, YAN Chao, TENG Chuc, et al. Kinetic studies of excited singlet oxygen atom O(1D) reactions with ethanol[J]. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2021, 53: 688-701.
- [71] POPOV N A. Effect of singlet oxygen O₂(a¹Δg) molecules produced in a gas discharge plasma on the ignition of hydrogen-oxygen mixtures[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2011, 20(4): 045002.1-045002.11.
- [72] SUN Wenting, GAO Xiang, WU Bin, et al. The effect of ozone addition on combustion: kinetics and dynamics[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 73: 1-25.
- [73] ZHAO Hongtao, LIU Shixiang, YAN Chao, et al. Studies of ozone-sensitized low- and high-temperature oxidations of diethyl carbonate[J]. *The Journal of Physical Chemistry A*, 2021, 125(8): 1760-1765.
- [74] OMBRELLO T, JU Yiguang, Fridman A. Kinetic ignition enhancement of diffusion flames by nonequilibrium magnetic gliding arc plasma[J]. *AIAA Journal*, 2008, 46(10): 2424-2433.
- [75] ZHANG T, JU Yiguang. NO effects on detonation formation in n-pentane/air mixtures with temperature gradients[R]. Virtual: 2021 AIAA Science and Technology Forum and Exposition, 2021.
- [76] ADAMOVICH I V, CHOI I, JIANG N, et al. Plasma assisted ignition and high-speed flow control: non-thermal and thermal effects[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009, 18(3): 034018.1-034018.13.
- [77] MAO Xingqian, ROUSSO A, CHEN Qi, et al. Numerical modeling of ignition enhancement of CH₄/O₂/He mixtures using a hybrid repetitive nanosecond and DC discharge[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 5545-5552.
- [78] BELLEMANS A, DEAK N E, BISETTI F. Skeletal chemical kinetics mechanisms for plasma-assisted combustion[R]. Orlando, US: 2020 AIAA Science and Technology Forum and Exposition, 2020.
- [79] BELLEMANS A, KINCAID N, DEAK N, et al. P-DRGEP: a novel methodology for the reduction of kinetics mechanisms for plasma-assisted combustion applications[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2020, 38(4): 6631-6639.
- [80] 郑洪涛, 张志浩, 刘潇, 等. 低热值燃料燃烧室等离子点火特性[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(6): 846-852.
- ZHENG Hongtao, ZHANG Zhihao, LIU Xiao, et al. Plasma ignition characteristics of micro-gas turbine combustor burning low-calorific-value fuel[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(6): 846-852. (in Chinese)
- [81] 游滨川, 刘潇, 刘倩, 等. 燃料重整对环管燃烧室燃烧特性的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(12): 1811-1818.
- YOU Binchuan, LIU Xiao, LIU Qian, et al. The effect of gas fuel reforming on the combustion characteristics of the can annular combustor[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(12): 1811-1818. (in Chinese)
- [82] 杨锐, 游滨川, 刘潇, 等. 滑动弧裂解CO₂机理[J]. *气体物理*, 2022, 7(1): 53-62.
- YANG Rui, YOU Binchuan, LIU Xiao, et al. Mechanism of CO₂ cracking by gliding arc[J]. *Physics of Gases*, 2022, 7(1): 53-62. (in Chinese)
- [83] 余涛, 杨家龙, 刘潇, 等. 射流等离子发生器实验与模拟[J]. *气体物理*, 2022, 7(1): 70-78.
- YU Tao, YANG Jialong, LIU Xiao, et al. Experiment and simulation of plasma jet generator[J]. *Physics of Gases*, 2022, 7(1): 70-78. (in Chinese)