

# 低温等离子体助燃技术及其在燃烧室中的应用

## Low-Temperature Plasma Combustion-Supporting Technology and Its Application in Combustion Chamber

■ 吴云柯 杨谦 王慧汝 夏姣辉 / 中国航发研究院

低温等离子体助燃技术作为一种新兴燃烧组织技术,有望突破常规燃烧组织技术瓶颈,为航空发动机面向高速、高效发展需求的常规主燃烧室、加力燃烧室设计以及超声速冲压燃烧技术、脉冲爆震燃烧技术、定容燃烧技术的发展提供新的思路。

**高**速、高效是航空发动机技术两大宏观发展趋势。其中“高速”是指航空发动机需满足未来飞行器巡航马赫数 ( $Ma$ ) 进一步提升的需求,能够在高马赫数来流条件下长时间稳定工作;“高效”是指航空发动机需满足未来各类飞行器能耗进一步降低的需求,以增加飞行器留空时间、延长飞行器飞行距离、减少污染物排放。两者对航空发动机燃烧技术提出了一个共性要求——在越来越短的流动停留时间内,确保燃烧化学反应顺利完成,这使得常规燃烧组织技术面临巨大挑战。近年来,随着等离子体技术的迅速发展,业界也逐渐认识到它在航空发动机燃烧方面有着广阔的应用前景,以应对目前面临的技术挑战。

### 低温等离子体助燃技术原理

当电场强度达到击穿空气或其他绝缘介质的条件时即可形成低温等离子体放电,这一过程被认为有助于燃烧的强化。利用低温等离子体助燃的物理与化学机制包括:利用“焦耳效应”实现对局部区域的快速加热,为燃烧提供高电子能量从而活化化学反应,基于电子与振荡激励形成局部强非平衡态区域,以及提

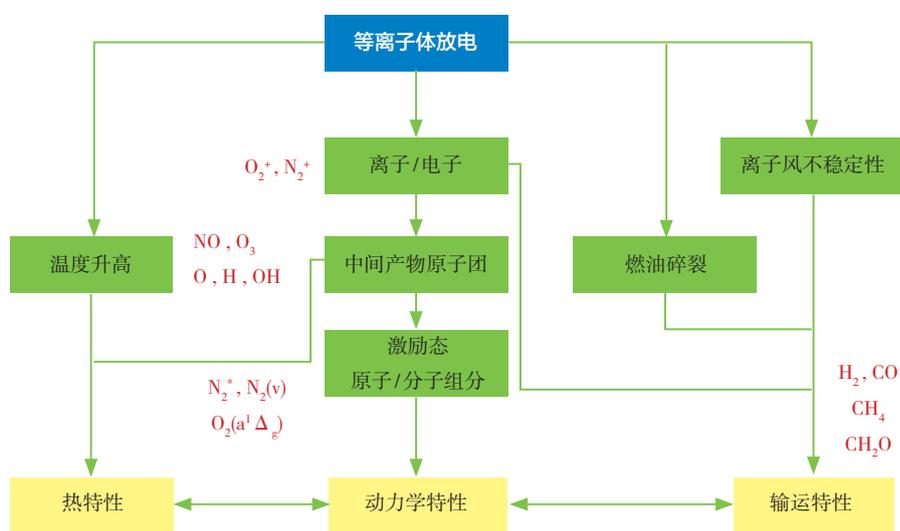


图1 等离子体作用于燃烧的机理

供电场库伦力和磁场洛伦兹力的作用(如图1所示)。

图1中的第一条强化燃烧的途径是热特性,即等离子体可通过带电粒子到中性原子的能量传输快速提升掺混油气温度,从而基于阿伦尼乌斯定律加快化学反应速率。第二条途径是动力学特性,即等离子体通过提供高能电子、离子,将氮、氧等中性组分激励至电极性态或振动态,或重新激励中间产物离子团、原子团,使反应加速或建立新的化学反应路径,从而强化燃烧。第三

条途径是运输特性,即通过电场或带电粒子作用,直接加剧燃油碎裂,或利用离子风不稳定,增强燃料与空气的掺混。

基于上述原理,低温等离子体助燃技术可实现在不改变燃烧室气动设计与结构设计特征的前提下,克服未来高速、高效航空发动机燃烧室流动停留时间远小于燃烧化学反应进行时间的关键瓶颈。

### 等离子体助燃技术进展

过去20年,在低温等离子体助燃技

术的诱人应用前景鼓舞下，国内外学者针对等离子体助燃技术在航空发动机领域的应用开展了较多研究，采用的低温等离子体激励方案包括平衡态的等离子体火炬、等离子体火花塞和非平衡态的丝状放电、电晕放电、微波放电、流光放电、表面放电和纳秒脉冲重复放电等。

其中的大部分研究都成功验证了等离子体在助燃方面的积极作用，同时也引入了更多待解决的问题，例如：研究中观测到的燃烧强化现象是否确定得益于等离子体对燃烧过程热特性或动力学特性的改善；非平衡态等离子体是否确定可从动力学层面提升火焰速度并拓宽可燃极限；等离子体对化学反应过程的激励与辅助作用是否在较低温度条件下更为有效；在工程应用层面何种形式的等离子体更为有效；目前观测到的助燃现象是由等离子体放电单一因素导致，还是由不平衡、不统一的多维放电效应导致的。

这些更为细节、机理层面待解决的问题，限制了等离子体在燃烧领域的工程应用，因此相关研究人员又将注意力转移到了等离子体助燃机理的基础研究。通过构造可控制变量的或具有一致性放电条件的点火与火焰结构，如流动反应器、激波管、平面对冲火焰和先进的燃烧光学诊断技术，目前人们对等离子体助燃技术的研究已经取得较大进展并上升到了新的认知层面，其中重大进展主要可归纳为以下四个方面。

一是发现等离子体助燃条件下，爆轰极限、发动机贫油点火极限与贫油吹熄极限将发生改变。其中，爆震激波管内控制变量的纳秒激光

脉冲等离子体放电试验验证了等离子体可在远离爆轰极限的区域引爆混合气体（如图2所示）；此后的发动机测试表明微波放电等离子体可在50MJ点火器功率条件下，将贫油点火极限进一步降低20%~30%。此外，针对低温等离子体助燃技术在驻涡稳燃的超燃冲压燃烧室及多模态燃烧室燃烧组织中的应用问题，研究表明低温等离子体助燃、凹腔稳燃条件下， $Ma_{2-3}$ 来流条件、激波管内的高速点火与燃烧组织难度

显著降低，有望突破通过常规燃烧组织方法较难实现的高 $Ma$ 点火与燃烧技术瓶颈。

二是等离子体助燃动力学过程的基础研究工作取得了新的认识。普林斯顿大学的研究团队在等离子体助燃化学反应动力学机理研究中取得了重要进展。他们完整地揭示了在等离子体助燃条件下，各类碳氢燃料燃烧反应的主路径（如图3所示）。即在等离子体作用下，反应物分子团在高能电子撞击下离子化，并经由电荷输

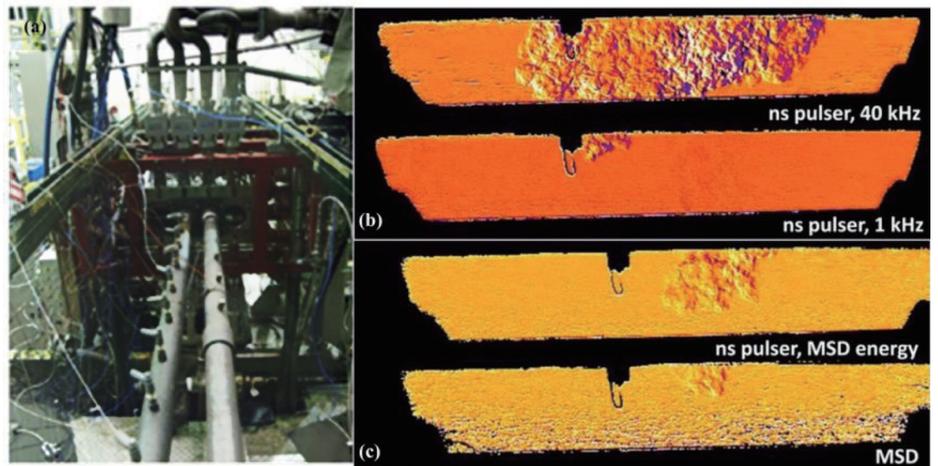


图2 脉冲爆震发动机的纳秒脉冲重复放电等离子体激励与连续爆震点火

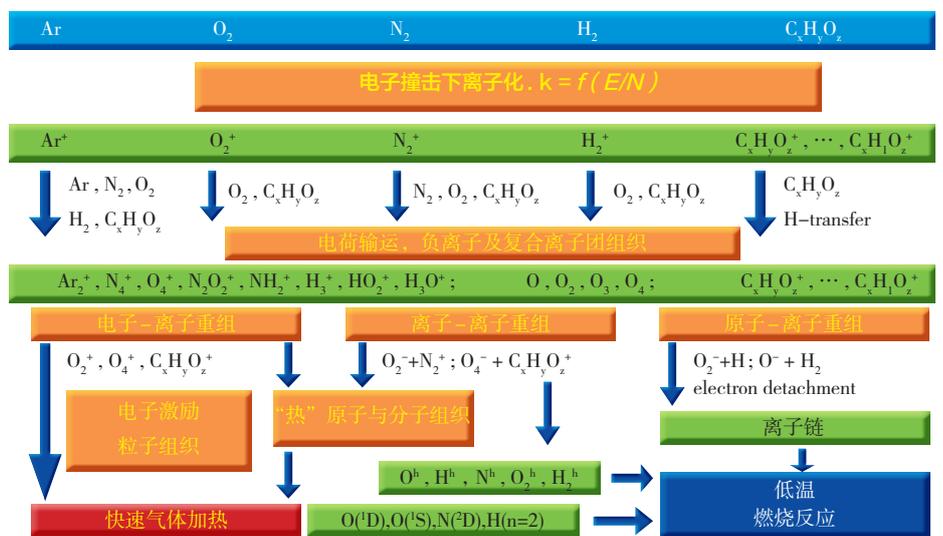


图3 普林斯顿大学的等离子体助燃化学反应主路径

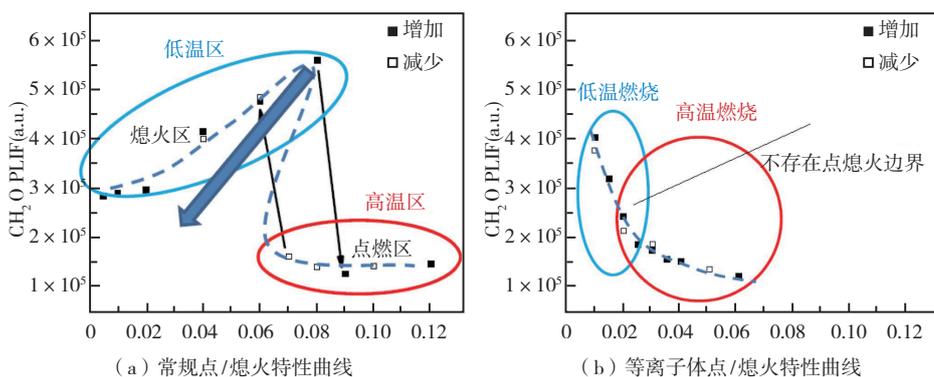


图4 常规燃烧点/熄火特性与等离子体助燃点/熄火特性比较

运、负离子及复合离子团的重新组织，构成3条反应链路：通过电子-离子重组得到高能电子激励后的高活性、高能量正离子团，这些离子团在电能作用下，发生焦耳热，使反应物气体快速被加热；离子与离子之间的重组，如氮氧离子、氧离子、碳氢离子团的重新组合；原子与离子的直接反应，如氢原子与氧离子团、氢分子与氧离子团。离子与离子的重组和原子与离子的反应，使得燃烧反应可在低于着火点的温度条件进行。乌迪(Uddi)等人通过将直接氧原子测量技术应用于等离子放电辅助点火，测得氧分子与热电子、激励态氮分子碰撞生成的中间产物氧离子，并发现氧分子转变为氧离子团的基元反应，即是低温下等离子助燃实现火焰点着的主要反应路径。

三是等离子助燃条件下的冷焰燃烧现象的发现。即等离子体可在熄火极限外直接点燃并维持火焰，而移除等离子体后火焰迅速熄灭，等离子体助燃的火焰点/熄火曲线与常规燃烧完全不同。图4(a)给出了任意燃料在常规燃烧条件下的点/熄火特性曲线，从图中可见，燃料浓度(横坐标)需超过点火油气比临界值，火焰才可被点燃；而当油

气比低于熄火临界值，火焰将熄灭。一般情况下，熄火油气比临界值要高于点火临界值，也即对于相同条件下的燃烧过程，火焰总是相对易于熄灭而较难点燃。与常规燃烧不同，如图4(b)所示，等离子体助燃条件下，低温燃烧与高温燃烧不存在明显分界，也即燃料可在任意油气比条件下被点燃，且点/熄火临界油气比是一致的。这一研究结果表明等离子体助燃技术对低温点火性能的提升效果要远大于火焰稳定性，且意味着如采用等离子体助燃技术，理论上将不再存在燃烧室贫油点/熄火点，这一性质对于提升航空发动机燃烧室点/熄火性能有着重要价值。此外，研究还表明等

离子体在低温下的点火性能优于高温条件，这就使得可以依赖等离子体人工维持一种低温燃烧状态，对此国外完成了非平衡态等离子体维持下的甲烷和n-庚烷低温燃烧试验验证，研究表明在远低于可燃边界的极低温度下，利用等离子体助燃，燃料仍可正常燃烧。

四是等离子体助燃条件下，最小点火能量降低、火焰最小初始化时间缩短的机理得到了解释。有相关研究发现并严格建立了最小点火能量与火焰初始半径的关联函数，研究表明最小点火能量与火焰初始半径是一个关于混合刘易斯数、燃油活性(活化能)、火焰厚度的函数。也即在可燃极限外，火核半径如无法达到大于火焰初始半径条件，火焰将无法点燃。而在非平衡态等离子体作用下，大分子燃油被击碎为小分子，导致刘易斯数降低；燃油化学特性改变，颗粒的着火体积变大，因而相应的火核尺寸将变大。这些因素综合作用，使得在等离子体助燃条件下，火核尺寸将大于火焰初始半径，从而点燃火焰，如图5所示。

此外，加州大学欧文分校、加州大学伯克利分校、德雷赛尔大学

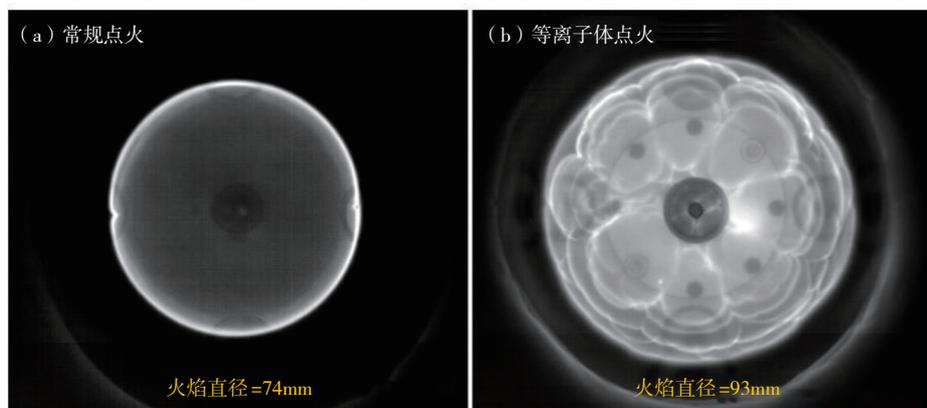


图5 常规点火器点火与等离子体点火火核尺寸的比较

以及美国国家航空航天局(NASA)格伦研究中心等还分别就等离子体助燃与电场耦合、等离子体助燃与磁场耦合和等离子体助燃与电磁场多场耦合相关概念做了初步探索,并取得了一定进展,验证了采用电场、磁场的外部调节,可进一步优化等离子体助燃过程的可控性。

这些进展都进一步推动了等离子体助燃技术从前沿基础研究向工程应用方面的转化。但截至目前,由于航空发动机燃烧过程的复杂性,以及燃烧室对体积、质量、可靠性等结构、总体性能参数的特殊要求,单独应用等离子体助燃技术仍存在一定困难。

## 等离子体助燃技术的应用实例

目前等离子体助燃技术在航空发动

机燃烧技术领域最接近,或已经得到应用的主要是加力燃烧室点火器和主燃烧室头部。

俄罗斯配装苏-57飞机的“产品30”发动机在其加力燃烧室内安装了等离子体点火装置,大幅改善了加力燃烧室的接通可靠性及高空、低温条件下的点火性能(如图6所示)。

GE航空集团发展了一种带等离子体激励器的低排放燃烧室头部结构。一方面,基于等离子体助燃作用,该燃烧室头部结构具有燃烧主动控制能力,可对不同工况下发生的燃烧不稳定现象进行主动抑制;另一方面,在等离子体作用下,燃料将部分脱氢,形成游离态的 $H_2$ ,这部分游离态氢可显著改善燃烧室的贫油熄火性能。此外,数值模拟研究表明,在未接通等离子体激励的状态下,燃烧室头部区域燃烧温度较

高,而较高的燃烧温度意味着较高的 $NO_x$ 排放。在相同当量比、接通等离子体激励的状态下,主燃烧室头部区域燃烧最高温度降低190K,从2340K降低至2150K, $NO_x$ 生成量从未接通等离子体激励的16 ppm( $10^{-6}$ ),降低至接通后的1 ppm。与此同时,燃烧效率未受到影响。

而在常压条件、甲烷燃料、52kW级主燃烧室旋流单头部模型燃烧室内开展的试验研究表明,在等离子体助燃作用下,贫油吹熄极限油气比从原型燃烧室的0.4,降低至0.11,而等离子体发生器的功耗则仅为300W量级,如图7所示。

这些研究,从不同角度验证了等离子体助燃技术在航空发动机燃烧室中的应用潜力。

## 结束语

低温等离子体助燃技术作为一种新兴燃烧组织与强化技术,在航空发动机燃烧技术领域有较高应用价值与潜力。一些国家已在低温等离子体助燃技术的基础与应用层面开展了较丰富的研究,并在型号发动机或研制中的发动机整机层面开展了应用,在提速、增效方面的效果较为显著。我国在低温等离子体基础研究领域的研究工作起步较早、起点较高,但在航空发动机常规主燃烧室、加力燃烧室及超燃、多模态、爆震燃烧室应用层面开展的研究则相对较少。鉴于低温等离子体助燃技术的发展价值,有必要在该领域增加研究方面的投入,尽早取得应用方面的突破。

航空动力

(吴云柯,中国航发研究院,工程师,主要从事航空发动机燃烧技术研究工作)

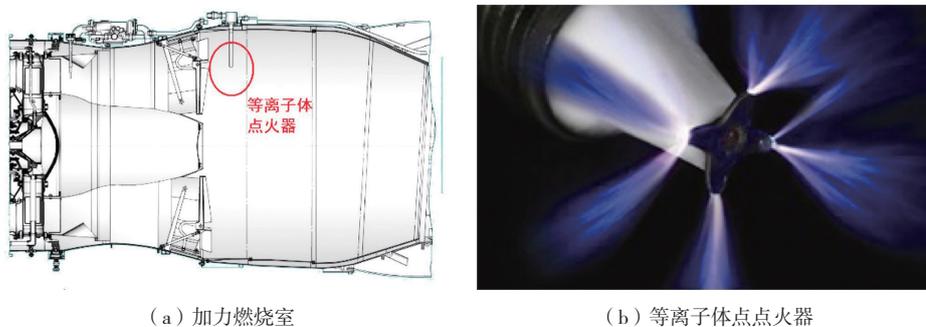


图6 等离子体助燃技术在加力燃烧室中的应用

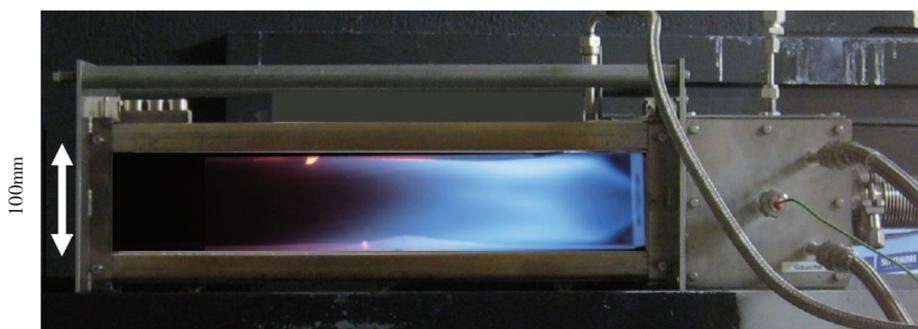


图7 主燃烧室单头部试验