

第 1 章 引 言

1.1 研究背景与意义

两次工业革命后,以煤炭、石油和天然气为主导的化石能源在推动人类文明进程中扮演了重要角色。目前全球每年的化石能源消耗总量超过了 13 Gtoe(BP 报告,2019),而超过 80%的化石能源通过燃烧进行初步转化,例如,火力发电,地面和空天运输,钢铁等金属冶炼行业,烘干炉、熔化炉和回转窑等工业设施(徐旭常 等,2007; Turns,2009; Chu et al.,2012)。新兴的燃料电池和电动汽车技术在一定程度上可以减少动力设备对传统燃烧技术的依赖,然而其高成本、低功率的特点及自身的技术瓶颈使得传统燃烧技术方式仍然无法被替代,特别是航空发动机和燃气轮机等先进动力设备中高速大功率的动力转换只能通过燃烧实现。

1.1.1 极端条件下的燃烧需求和挑战

燃烧室是航空发动机和燃气轮机的核心部件之一,燃油或燃气和前端压气机导入的高温高压空气在燃烧室内混合,通过燃烧反应实现化学能向热能的转换,生成的高温气体进入涡轮膨胀做功形成推力。现代航空发动机朝着高推重比发展,需要同时满足高可靠性、高效率、低排放、多工况、多载荷、环境适应性强及调节迅速等多个条件,而传统的燃烧组织方式对于发动机性能的优化已经逼近极限,不能满足现代航空发展的设计需求。具体体现在以下几个方面。

(1) 燃烧需要满足日益严格的排放标准。低污染物排放是民用航空发动机和工业燃气轮机的发展趋势。燃烧室产生的主要污染物包括氮氧化物(NO_x)、未燃尽碳氢(UHC)、一氧化碳(CO)和烟(smoke)等,这些物质对机场局部的空气质量甚至全球气候变化产生了危害(张弛 等,2012)。国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)指出,在高温升和高压比的发展目标下, NO_x 成为最难控制的污染物(ICA0,2010)。各

个国家和组织针对民用航空发动机的污染排放制定了严格的标准,比较有代表性的是 ICAO 颁布的 CAEP(Committee on Aviation Environmental Protection)标准,从 1986 年制定的初代标准到现在最新的 CAEP/8,主要改变的是对 NO_x 排放量的限制。图 1.1 展示了欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency,EASA)制定的不同总压比(π_∞)条件下,最大额定推力(F_∞)高于 89 kN 的航空发动机在起降循环(起飞、爬升、进场和慢车)中 NO_x 排放总量(D_p)的限定,以及 20 世纪 70 年代至今,国际上生产的不同型号航空发动机的取证数据(EASA,2019)。随着发动机研制技术的进步,2015 年之后生产的发动机可以完全符合 CAEP/8 的标准,但是不能充分满足中长期目标的需求。

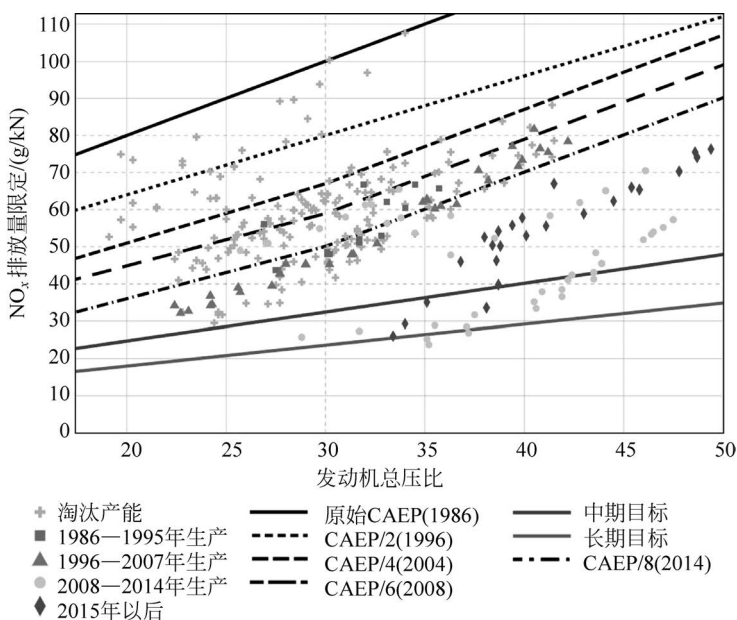


图 1.1 ICAO 制定的民用航空发动机 NO_x 排放量限定(D_p/F_∞)及取证数据

国内外发展的先进燃烧组织方式包括双环预混旋流(twin annular premixing swirled, TAPS)(McManus, 2013)、驻涡燃烧(trapped vortex combustion, TVC)(Hsu et al., 1998)、贫油直喷(lean direct injection, LDI)(Tacina et al., 2001)等。其中,低氮贫燃技术通过减小当量比降低火焰温度,减少了热力型 NO_x 的排放,成为燃烧室设计的主流方向(Lieuwen et al., 2005)。然而,极端贫燃条件下的燃烧不稳定性仍是一个相当棘手的

难题,容易对燃烧器造成损害和破坏(Candel,2002; Poinso,2017)。为了实现低当量比条件下的稳定燃烧,甚至进一步拓宽贫燃极限,采用新型的燃烧增强技术迫在眉睫(Ju et al.,2015)。除了航空发动机外,在更广泛的工业燃烧设备中,寻求新型燃烧技术(new concept combustion)是一个重要的研究趋势。

(2) 复杂系统内高参数燃烧是现代发动机的趋势。一方面,航空发动机朝着高温升和高推重比的方向发展,发动机的燃烧性能需要满足更苛刻的条件。“二战”前后,军用飞机使用燃气涡轮发动机替代传统的活塞式发动机来作为主要的动力装置,且目前已经发展到第四代战斗机和发动机(此处按照传统的发动机划代概念,美国和俄罗斯称之为第五代)。目前,国际上仅美、英、俄、法国具备独立研制和生产先进航空发动机的能力,生产厂商包括美国通用电气(GE)、普惠(PW),英国罗罗(RR),俄罗斯联发、克里莫夫(Klimov),以及法国斯奈克玛(SNECMA),中国仍然处于技术追赶阶段。表 1.1 整理了第 1~4 代军用发动机参数和典型示例,包括类型、参数、型号、典型装备战斗机等(黄维娜等,2014; 宋军等,2017)。发动机参数的提升离不开燃烧技术的发展,特别是超音速燃烧的邓克尔数(Damköhler number, Da)较小,点火和稳燃都十分困难。

表 1.1 第 1~4 代军用发动机参数和典型示例

代数	第一代	第二代	第三代	第四代
装备年代	20 世纪 40 年代	20 世纪 50—60 年代	20 世纪 70—80 年代	20 世纪 90 年代之后
发动机类型	涡喷	加力涡喷/涡扇	加力涡扇	高推重比涡扇、变循环发动机
燃烧室	分管燃烧室	环管燃烧室	环形燃烧室	短环形燃烧室
推重比	3~4	5~6	7~8	9~10
总增压比	4~12	8~20	21~35	26~35
涡轮前温度/K	1200~1300	1400~1500	1600~1750	1800~2000
最大马赫数	0.8~0.95	>2.0	>2.0	>2.0
典型型号	J42, J57, RD-45	J79, TF30, MK202, R11	RD33, F100, F110, M53	F119, F135, F136, EJ200
装备飞机	F-86, F-100, F106, 米格-15	F-4, F-104, 米格-21, J8	F-16 米格-29, 幻影 2000, J10	F-22, F-35, Su-57, J20

另一方面,发动机燃烧室通常是一个非稳态和非线性的系统,在复杂流场、温度场、声场、组分场和压力场条件下,流体的动力学稳定性、高拉伸率

区域的火焰传播、火焰释热率与复杂声学边界的匹配等都是燃烧不稳定性的主要内容(Culick, 2006; Lieuwen et al., 2005; Dowling et al., 2003)。为了实现燃烧器的高参数运行,特别是对于燃烧室、压气机和透平耦合成的复杂系统,需要同时满足高压、高温、高流速的条件。上游来流、燃烧室本身的释热率及下游的压力传递等造成的扰动,在满足一定的燃烧室边界条件下容易形成热声耦合现象而导致扰动的骤然放大,造成熄火和振动等剧烈的不稳定,甚至导致整个系统受到损坏(Ducruix et al., 2003; Poursaiedi et al., 2013; Dowling et al., 2015)。燃烧不稳定性在复杂系统和高参数条件下带来的挑战急剧上升,常规的燃烧组织技术很难满足先进动力设备的需求。

(3) 高机动性需求和极端自然环境给燃烧技术发展带来了更大的挑战。图 1.2(a)展示了超音速飞机的典型包线,发动机需要适应较宽的飞行速度和海拔高度范围,并且朝着宽包线和多用途方向发展,特别是战斗机还面临格斗和机动飞行的需求。图 1.2(b)展示了 NASA 某发动机的工作极限相图,在加速和减速等宽广灵活的工作范围内,发动机的成功点火、稳定燃烧和迅速响应更具挑战性。加速时容易受到系统本身及材料特性的限制(上极限);减速时容易出现燃烧不稳定甚至熄火(下极限),一旦失控可能会导致发动机受破坏甚至整架飞机坠毁。此外,在极端的自然环境下,如高原地区的低气压、高寒和氧气稀薄,发动机的点火和运行更加困难。在极限条件下,如何保证发动机在吹熄极限附近能够维持稳定,甚至实现再次点火,是新型发动机燃烧技术的重要拓展方向。

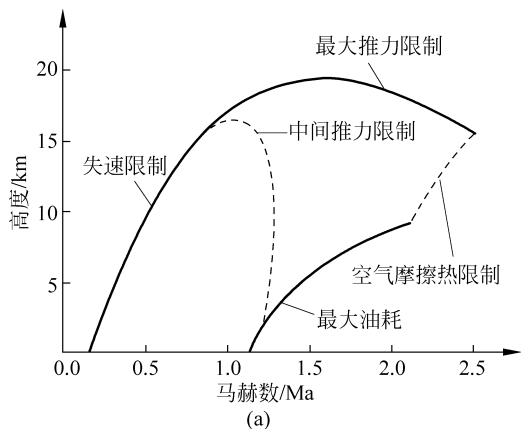


图 1.2 超音速飞机的典型包线(顾诵芬等, 2001)(a)与 NASA 某发动机的工作极限相图(Decastro et al., 2008)(b)

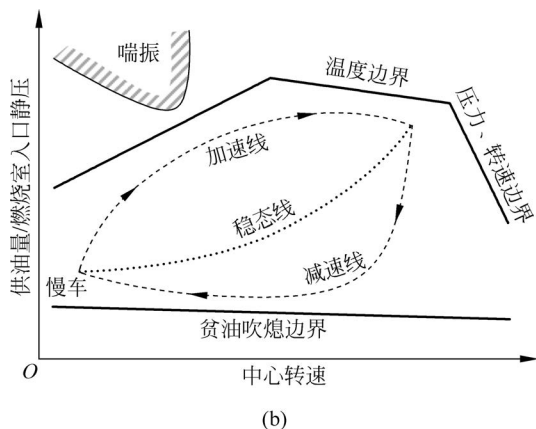


图 1.2 (续)

1.1.2 传统燃烧调控方式及其局限性

燃烧不稳定性的调控方法可以分为被动式和主动式(Docquier et al., 2002; 李磊 等, 2010)。表 1.2 列出了几种典型的被动式调控方法, 包括点火装置设计、燃烧器几何结构优化设计、使用亥姆霍兹共振腔及其他声学阻尼调控。

表 1.2 传统被动式燃烧调控的主要方法

方法	实施过程	实施效果	文献
点火电极优化	多电极布置	达到高压点火标准	Astaneï et al., 2015
燃烧器结构优化	燃料喷射参数设计	解决某燃烧室的不稳定性	Steele et al., 2000
亥姆霍兹共振腔	安装亥姆霍兹共振腔减振	Rijke 型燃烧器稳定燃烧极限拓宽 24%	Zhang et al., 2015; Zhao et al., 2009
声学阻尼	安装孔板阵列消除平面声波	吸收特定频率 80% 的能量, 抑制能量反向传递	Eldredge et al., 2003

除了气相火焰外, 国防科技大学的聂万胜和庄逢辰等(1998)将多种声腔技术应用于液体火箭发动机中进行燃烧不稳定性的控制, 并且提出了不同声腔的有效作用范围, 北京航空航天大学的郭志辉等(2008)采用穿孔板和环形背腔降低了不稳定发声的幅值。

燃烧的主动调控是指通过外加激励器和驱动器, 实现对速度脉动和压

力脉动等的主动控制。对于热声耦合的燃烧室,可以分为开环控制和闭环控制,其中,前者的系统简单但是作用效果有限,后者复杂但是应用前景更为广阔。在实验室研究中,最常用的方法是利用扬声器产生特定频率声波对火焰场中的热声耦合进行调控(Lang et al., 1987; Dowling et al., 2005; O'Connor et al., 2015; 张晓宇, 2014)。此外,对于黎开(rijke)管燃烧器,清华大学的翁方龙等(2014)使用穿孔陶瓷和铁丝网,结合数字控制系统对拍振和极限环进行了主动调控研究,浙江大学的周昊等(2015)使用横向射流抑制了燃烧不稳定性。主动控制通常基于流场速度脉动、火焰释热率脉动和压力脉动等多场耦合作用开展,我们需要深入理解复杂的燃烧动力学机理,建立火焰传递函数模型甚至非线性的火焰描述函数模型(Lieuwen, 2003; Huang et al., 2009)。

无论是对被动式还是主动式控制方法的研究,虽然目前研究人员在理论和实验上取得了大量进展,但所建立的实验室尺度模型与真实燃烧器之间存在着巨大的差距。首先,实际燃烧器结构复杂,燃烧功率大;其次,采用大分子液态燃料雾化燃烧,而非简单的气相燃烧;再次,燃烧不稳定性发生在高强度湍流燃烧中,基于来流速度和压力的控制存在迟滞效应;最后,燃烧室存在几十至上百个喷嘴产生相互作用的火焰,而非单个孤立的喷注系统(Poinsot, 2017)。目前的调控方法不仅不能全面、有效地控制复杂燃烧行为,也无法彻底克服极端工况条件,甚至可能带来新的不稳定问题,亟须发展更加多样化和灵活的燃烧调控方法。

因此,等离子体助燃作为新型的直接调控技术应运而生,基于可控性强、作用路径多样和延迟时间短的优势在 21 世纪得到了迅速发展(Starikovskiy et al., 2013; Ju et al., 2015; Adamovich et al., 2015; Popov, 2016; Yang et al., 2017),并于 2009—2014 年入选美国国防部跨学科大学计划(MURI)重点资助研究(Lempert, 2015),2016 年被列入我国国家自然科学基金“十三五”发展规划的优先发展领域。

1.1.3 等离子体调控燃烧的优势分析

等离子体是一类特殊的物质,由自由移动的带电粒子(电子、离子等)和中性粒子组成,表现出准电中性和集体行为,是宇宙中区别于固、液、气态的第四类物质形态(Chen, 1974; Lieberman et al., 1994; Fridman, 2008; 邵涛等, 2015)。等离子体在宇宙中广泛存在,具有非常宽泛的粒子密度和温度。图 1.3 是参照美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore

National Laboratory, LLNL)等离子体带电粒子密度-温度相图所绘制的示意图,既包含极光这种稀薄等离子体,也包括太阳核心这种高温高密度的等离子体,还包括人类研制出的磁约束聚变反应堆(magnetic fusion reactor)和惯性约束核聚变(inertial confinement fusion)装置等强电离高温等离子体。此外,火焰也是一种弱电离的等离子体,其在化学反应过程中生成了少量自由移动的电子和离子,带电粒子的密度在 10^{15} m^{-3} 量级。

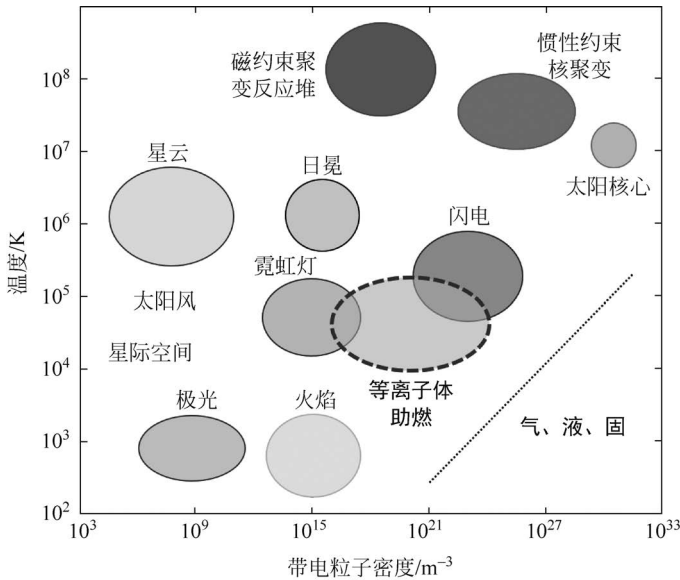


图 1.3 等离子体粒子密度-温度相图(参照 LLNL)

等离子体可以根据热力学平衡状态进行划分,太阳及核聚变装置是典型的热力学平衡等离子体。而本书用于助燃的等离子体多处于非热力学平衡状态,所含带电粒子的能量(温度)远高于中性气体分子和重粒子的平均温度,又可称为冷等离子体。图 1.3 中的虚线标记了本书用于助燃的非平衡等离子体的参数范围,电子密度为 $10^{16} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$,电子温度为 $0.5 \sim 10 \text{ eV}$,这里的电子伏特(eV)是电子温度的单位: $1 \text{ eV} \approx 11\,605 \text{ K}$ 。非平衡等离子体助燃作为一种比较新颖的主动调控技术,具有以下显著优势。

(1) 等离子体对火焰的作用路径多种多样。如图 1.4 所示,结合普林斯顿大学据诒光和孙文廷的综述性工作(Ju et al., 2015),等离子体助燃的路径可以被归纳为三方面:热效应、化学动力学效应和气动效应。热效应体现在提高局部温度,类似值班火焰达到加强和稳定燃烧的目的;化学动

力学效应通过放电激发、碰撞和离解产生大量活性物质,包括离子(如 O_2^- 、 N_2^+)或电子、自由基(如 O 、 H 、 OH)和激发态物质(如 N_2^* 、 $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$),能够加快燃料在低温和极限条件下的反应速率;气动效应通过离子风改变局部流场增强湍流度和掺混,或促使大分子物质破碎成更容易扩散和运输的小分子。此外,任翊华等(2018)通过研究发现,电场也可以与火焰直接发生相关作用。

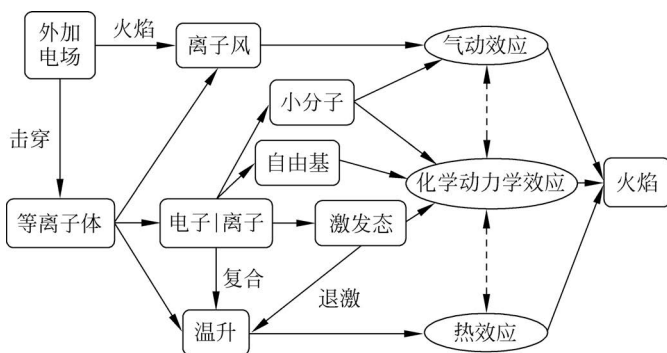


图 1.4 等离子体/电场与火焰作用路径图

(2) 等离子体可以直接作用于燃烧区域,延迟时间较小。如图 1.5 所示,传统的燃烧调控方式主要通过速度或压力脉动等比较单一的途径来传递影响(Candel, 2002),从发出调控信号到作用于火焰存在迟滞效应;此外,传统方法会对整个流场和火焰场产生影响,缺乏针对性。相比之下,等离子体既可以通过流场传递离子风效应,类似于传统方式间接地作用于火焰;又可以在火焰反应区域发生击穿放电,从而直接、迅速地于火焰锋面注入热量和自由基等活性物质,相比于火焰反应的特征时间几乎没有延迟,实现了对反应速率和火焰结构的实时调控。

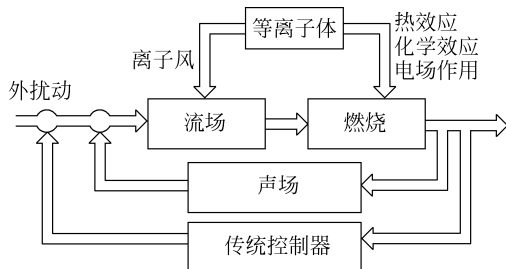


图 1.5 传统燃烧不稳定性调控(Candel, 2002)与等离子体调控的比较

(3) 等离子体源具有多样性,且输出参数灵活。本书主要利用高压电场击穿产生的等离子体,未包括磁场诱导的等离子体。电源技术的发展为等离子体助燃的开展提供了良好的保障,常用的等离子体驱动电源包括直流/交流电源、纳秒/微秒脉冲电源、微波电源和射频电源等,甚至可以采用不同电源的组合,产生具有不同电子温度、电子密度和作用频率、时间长度的等离子体,具体的等离子体类型将在后文进行介绍。此外,我们还可以设计等离子体或者电场的电压、频率、脉宽等不同参数,丰富等离子体作用路径的多样性。

图 1.6 是低压条件下直流气体放电的伏安特性曲线(Roth,2001),可以看出,电压首先上升到 C 点后开始出现比较强的电离,随之进入汤森放电(Townsend discharge)区间,然后随着电压和电流上升,在 D 点形成电晕放电,并进一步在 E 点达到击穿阈值,发生击穿进入辉光放电区域。若电流进一步增大,则会形成电弧放电。从 A 点到 K 点的各阶段,放电参数发生了明显的变化,因而对火焰的调控作用也有很大区别,可以根据实际的调控需求进行设计。

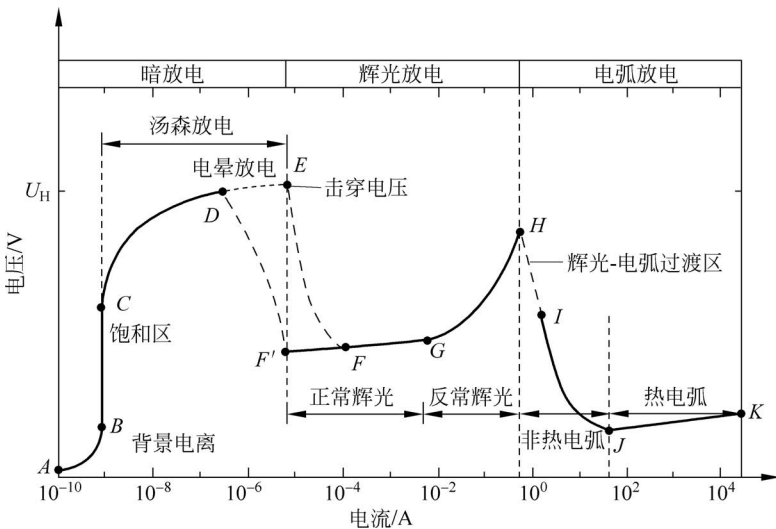


图 1.6 低气压条件下直流气体放电的伏安特性曲线(Roth,2001)

1.1.4 等离子体在新型燃烧技术中的应用

出于节能和低排放的需求,工业燃烧领域陆续发展了一系列新型燃烧、反应技术,包括燃料电池(Boudghene et al.,2002)、冷火焰(cool flame)(Ju et al.,2019)、柔和/无焰燃烧(MILD/flameless combustion)(Cavaliere et al.,

2004; Perpignan et al., 2018)、低温燃烧(low-temperature combustion)(Battin-Leclerc, 2008)、微尺度燃烧(microscale combustion)(Ju et al., 2011)等。其中,燃料电池技术打破了基于传统热力循环的燃料使用方法,理论上可以达到极高的转化效率和零排放,但是目前其成本仍然较高(Debe, 2012; Staffell et al., 2019)。另外几种技术本质上还是依托传统的燃烧反应,主要思路是降低反应核心区温度以减少 NO_x 排放,但可能引发熄火和燃烧不稳定性。

以冷焰燃烧为例,冷火焰温度在 1000 K 以下,它在大气压条件下很难稳定存在,等离子体的介入为形成和研究冷火焰提供了便利(Ju et al., 2011)。例如, Sun 等(2014)使用纳秒脉冲放电,研究了等离子体在冷火焰区域的直接放电和调控效果,结果表明,等离子体有助于提高 CH_2O 等自由基浓度,能够显著改变化学反应路径,从而缩短反应所需的停留时间。更多的对常压下大分子燃料的冷火焰研究借助臭氧(O_3 , ozone)的辅助(Sun et al., 2019),研究的直链类烷烃燃料从正庚烷(C_7)到正十四烷(C_{14}),研究对象包括扩散火焰的着火、熄火和预混火焰的维持、传播等(Reuter et al., 2016, 2017a, 2017b; Yehia et al., 2019; Won et al., 2015)。可以注意到,等离子体是最常见的臭氧发生器,并且对等离子体助燃的研究也表明,等离子体在氧气中放电生成的氧基活性物质,如 $\text{O}({}^1\text{D})$ 、 O_3 和 $\text{O}_2({}_a\Delta)$, 是促进燃烧的重要中间产物,因此臭氧辅助燃烧也可以纳入等离子体助燃的范畴。

等离子体对于其他一些新型燃烧技术也可以发挥独特的作用。例如, Wada 等(2015)设计了同轴射流的等离子体辅助 MILD 燃烧的反应器,并经过研究发现,纳秒脉冲驱动的介质阻挡放电能够拓宽 MILD 燃烧的区间,并且改变火焰的形态和结构; Nagaraja 等(2015)和 Rousso 等(2017)研究了纳秒脉冲放电作用下正庚烷的低温着火、氧化和裂解,发展了低温条件下等离子体参与的正庚烷裂解和氧化反应机理,证实了放电对于低温裂解和氧化反应路径的调控作用;北京交通大学的孙进桃等(2020)和毛兴谦(2019)也采用实验和模拟的方法研究了纳秒脉冲放电对甲烷和 C_5 燃料低温氧化与点火的辅助作用。

1.2 共性科学问题

1.1 节的背景介绍归纳了等离子体调控燃烧的可行性和优势,对于这个问题的基础研究,核心是理解等离子体与火焰之间的相互作用规律及得