

等离子体强化燃烧的目前研究进展

何立明, 刘兴建, 赵兵兵, 金 涛, 于锦禄, 曾 昊

(空军工程大学 航空航天工程学院 等离子体动力学国家重点实验室, 西安 710038)

摘 要: 介绍了等离子体强化燃烧的基本原理,总结了等离子体强化燃烧的 3 种途径,分别是热强化、动力学强化与输运强化;对国际上,特别是国内在等离子体强化燃烧的应用验证、作用机制和数值仿真研究方面的最新代表性成果进行了综述.提出了等离子体强化燃烧的 4 个研究方向,分别是等离子体强化燃烧机理、多场耦合建模与仿真、测试诊断研究,以及等离子体强化燃烧在航空发动机中应用的其他科学与技术问题,同时提出了开展这 4 方面研究工作的一些建议,主要是定量研究等离子体点火与助燃的 3 种效应,分别建立各效应与点火特性、助燃特性之间的关系;建立等离子体强化燃烧的详细动力学模型;应用先进的测试诊断设备,发展等离子体强化燃烧的新型测试技术;考虑等离子体点火与助燃应用到不同类型发动机燃烧室时的匹配问题,特别是等离子体电源的小型化与轻型化问题等.

关 键 词: 等离子体; 点火; 助燃; 作用机制; 多场耦合仿真

中图分类号: V231.2; O53; TM8; TK5

文献标志码: A

Current investigation progress of plasma-assisted ignition and combustion

HE Li-ming, LIU Xing-jian, ZHAO Bing-bing,

JIN Tao, YU Jin-lu, ZENG Hao

(State Key Laboratory of Science and Technology on Plasma Dynamics,
Aeronautics and Astronautics Engineering College,
Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The basic principle of plasma-assisted ignition and combustion was introduced, and three pathways of plasma-assisted combustion, i. e. : heating enhancement, kinetic enhancement and transport enhancement, were summarized. The latest research achievements in application verification, action mechanism and numerical simulation of plasma-assisted combustion in the world, especially in domestic fields, were reviewed. Four research directions of plasma-assisted combustion were put forward, including: plasma-assisted ignition and combustion mechanism, coupled multi-field simulation, test and diagnosis investigation, and other scientific and technical issues concerning plasma-assisted ignition and combustion application in aviation engine, respectively. In the meantime, some suggestions on these research works were presented below: to quantitatively study the three effects of plasma-assisted ignition and combustion, and established the relationship between each effect and ignition and assisted-combustion characteristics; to build detailed kinetic mechanism model of plasma-assisted ignition and combustion; to develop new testing techniques of plasma-assisted ignition and combustion using advanced test and diagnostic facilities; to consider the adaptation issue when plasma-assisted ignition and

收稿日期: 2014-10-18

基金项目: 国家自然科学基金(51436008, 50776100, 51106179); 陕西省自然科学基金(2015jq5124);
空军工程大学航空航天工程学院创新基金(CXJJ201416)

作者简介: 何立明(1959—),男,浙江上虞人,教授、博士生导师,博士,主要从事等离子体点火与助燃技术、新型燃烧室结构与冷却技术及脉冲爆震发动机关键技术的研究.

combustion were applied into various types of combustion chambers of engines, especially the problem of light weight and miniaturization of plasma power supply.

Key words: plasma; ignition; assisted combustion; action mechanism; coupled multi-field simulation

等离子体强化燃烧包括等离子体点火和等离子体助燃两个方面。等离子体点火是利用高温、高速、富含活性粒子的等离子体来进行点火的,可以缩短点火延迟时间,扩大点火边界,提高点火可靠性。等离子体助燃是利用气体放电,产生具有化学活性的组分,加热可燃混合气,并对流场产生扰动,改变其燃烧状态来助燃的,能扩大稳定燃烧范围,降低有害气体的排放。

等离子体是由带电的正离子、负离子、自由基和各种活性基团组成的集合体,属物质的第4态。等离子体中存在的带电粒子,对电场和磁场产生强烈的响应,因此,等离子体与固体、液体或气体有本质的区别^[1-2]。等离子体除了具有隐身、增强气流流动稳定性的作用外,在燃烧室中可以产生能量强大的高温、高速火舌来点燃可燃混合气和大密度的活性粒子来强化燃烧性能^[3-4]。近年来,等离子体强化燃烧已经成为国际上应用基础研究领域中颇受关注的一个研究方向。国外进行等离子体强化燃烧研究的单位主要有普林斯顿大学、南加州大学、俄亥俄州立大学、斯坦福大学、美国海军研究生院、美国空军实验室、美国 Applied Plasma Technologies (ATP)公司、莫斯科物理技术学院、莫斯科高温物理研究所、东京大学、法国国家科学院,国内主要有中国科学院(西安光机所瞬态光学与光子技术国家重点实验室、工程热物理研究所)、中国科技大学、空军工程大学、哈尔滨工程大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、西安交通大学、西北工业大学、天津大学等单位。

Starikovskiy 等^[5-6]综述了近年来非平衡等离子体强化燃烧的重要实验研究成果,Popov^[7]对 H_2/O_2 混合气等离子体点火方面的理论与实验研究工作进行了详细地总结。近年来,包括碳氢化合物在内的多种燃料的等离子体强化燃烧研究取得了明显进展,特别是,通过实验研究与数值模拟相结合的方法对等离子体强化燃烧的机制进行了验证^[8-14]。为了准确把握国际上等离子体强化燃烧研究的最新进展,引起更多国内学者对该技术的关注,加快等离子体强化燃烧技术的应用,本文对等离子体强化燃烧研究进行综述。本文首先介绍等离子体强化燃烧的基本原理,然后提炼出等

离子体强化燃烧研究的三大关键科技问题,并对各问题的国内外研究现状进行回顾与总结,最后讨论了目前研究中存在的困难及尚未解决的问题,对未来的研究工作进行展望。

1 等离子体强化燃烧的基本原理

不考虑燃烧系统的机械特性,燃料的氧化速率是由其化学动力学速率决定的。阿累纽乌斯(Arrhenius)定律指出,基元反应的化学反应速率常数可以表示为

$$k \approx Ae^{-E_a/RT}$$

其中 E_a 为活化能,即化学反应可以发生的临界能。 T 为温度, A 为指前因子, R 为通用气体常数。特别要注意的是,活化能的大小既反应了化学反应进行的难易程度,也可以反应温度对反应速率影响的大小,对活化能大的反应,温度的影响更为显著;在高温下,温度的影响下降^[15]。通常,控制链锁反应过程的反应速率与活化能直接相关。

从化学反应速率常数的定义式中发现,可以通过不同的方式控制燃料氧化的化学反应动力学过程。最简单的方法就是提高温度,即“热强化”。但是这种方法要求反应开始时就要实现热焓的沉积与转换,因而很难实现。温度的升高可以加速许多反应的进行,但是温度对控制链锁反应过程的反应速率的影响很小。所以,热强化方式的敏感性较弱。另外一种方法就是增大化学反应的指前因子或减小总包反应的活化能,即“动力学强化”。由于这种方式直接增大控制链锁反应过程的反应速率,所以动力学强化方式更加有效,敏感性更强^[15]。

等离子体中携带有大量高能电子,高能电子与原子或分子发生碰撞,使原子或分子被激发、离解、电离,产生许多活性反应组分。同时,等离子体激励中还会产生常规燃烧系统中没有的中间物种,从而引入新的反应链改变燃烧的动力学特性,即实现“动力学强化”的目的。例如,空气等离子体放电的电子碰撞反应 $e+O_2 \rightarrow e+O+O(1D)$ 生成的氧原子中几乎有一半都是激发态氧原子 $O(1D)$ 。常温(300 K)下,化学反应 $O(1D)+H_2 \rightarrow H+OH$ 的速率常数大约为 $44\,000\text{ m}^3/\text{s}$,而当反

应物中参与反应的是基态氧原子 O 时,其反应速率常数只能达到 $1000 \text{ cm}^3/\text{s}$ 数量级. 动力学强化的方式可以改变典型“S 曲线”的位置,使得燃料的氧化反应可以在极端条件下发生,扩大点火范围与稳定燃烧范围^[3].

此外,等离子体放电反应中还会产生大量焦耳热、熄灭反应放热,形成由等离子体到流体的能量传递过程,提高气体温度,实现“热强化”的目的. 等离子体放电能将能量集中在瞬间释放,提高激励强度,在放电区域产生瞬间的温度升和压力升,对流场也会产生强扰动,增强燃料与空气的混合、焰锋与新鲜混合气的接触面积,实现“输运强化”的目的.

综上所述,等离子体激励可以产生热量、自由基、激发态物种、电子/离子、燃料的裂解和粒子输运,这些因素的综合作用可以对燃料的燃烧起到强化作用,如图 1 所示.

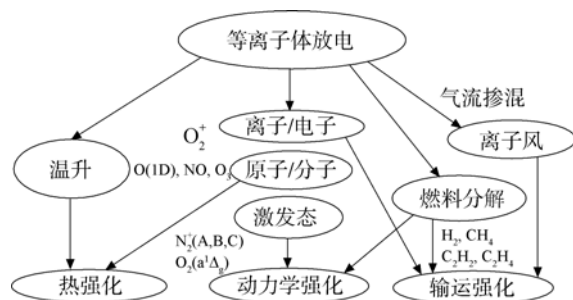


图1 等离子体强化燃烧的基本原理示意图

Fig. 1 Principles of plasma-assisted ignition and combustion

2 关键科技问题研究进展

2.1 等离子体强化燃烧的应用验证

首先,需要对等离子体强化燃烧的激励方式进行研究.

等离子体强化燃烧的激励方式研究中涉及放电方式(包括电弧放电、滑动弧放电、丝状放电、微波放电、电晕放电、介质阻挡放电等)、激励器(包括点火器与助燃激励器)形式、电源类型(包括纳秒、微秒、毫秒等系列电源)、施加(活化)方式等选择,不同的设计方案下等离子体强化燃烧的效果也会有差异.

根据等离子体温度的不同可将等离子体分为热力学平衡等离子体和非热力学平衡等离子体. 热力学平衡等离子体中所有粒子(电子、离子、中性粒子)的温度几乎完全相同,而且等离子体的温

度很高,可以达到 $20\,000 \text{ K}$. 但是,由于存在能量损失,严格意义上的热力学平衡无法达到,通常获得的是各种粒子温度近似相等的局部热力学平衡等离子体. 局部热力学平衡等离子体的显著特征就是温度非常高,所以主要应用其高温特性,如电弧等离子体被应用到切割、焊接等工艺中;“非局部热力学平衡状态”等离子体又称为非平衡等离子体,其特点是电子温度可高达上万度,而重粒子温度则接近或稍高于常温,通常在低气压、低质量流量条件下产生,但是通过强电离放电也可以在高气压条件下产生. 高气压非平衡等离子体可以满足高电子能量、大电子密度的化学应用需求.

2006年,Leonov等^[16]综合考虑热等离子体与非平衡等离子体的特点,研究了不同放电方式产生的等离子体对燃烧强化特性的影响,总结了各种放电方式的优缺点. 在等离子体激励器的设计过程中,需要充分考虑各种放电方式的优缺点,然后结合技术指标与关键参数要求等选择放电方式. 通常,等离子体点火时选择电弧放电^[17]、微波放电^[18]、电晕放电^[19],等离子体助燃时选择辉光放电^[20]、介质阻挡放电^[21]、滑动弧放电^[22]、快速电离波放电^[23]等. 同时,电源类型对放电特性、活性粒子激发等都有较大的影响,从而产生了直流电弧与交流电弧等离子体点火器,纳秒脉冲、微秒脉冲与毫秒脉冲介质阻挡放电. 施加(活化)方式指采用直接电离助燃,也可以先电离再喷入^[24].

其次,在等离子体强化燃烧激励方式研究的基础上,国内外研究者进行了等离子体点火与助燃的实验验证研究.

2.1.1 等离子体点火的实验验证

2005年,Matveev^[25]将等离子体点火器应用到涡轮燃气发动机上,进行了 12 km 高度的高空等离子体点火实验,结果表明等离子体点火器具有良好可靠的高空点火性能. 等离子体燃料喷嘴可以实现燃料的快速雾化,加快燃料与新鲜混合气的掺混,促进燃料的完全燃烧,提高燃烧效率. 图2为等离子体点火器与等离子体燃料喷嘴的实物照片.

2007年,Charles^[26]研究了脉冲爆震发动机(pulsed detonation engine, PDE)中瞬态等离子体点火器的点火特性,瞬态等离子体点火器及其在PDE中的安装如图3所示. 研究表明,瞬态等离子体点火器可以成功起爆特征速度为 55 m/s 的JP-10/空气混合气和 100 m/s 的乙烯/空气混

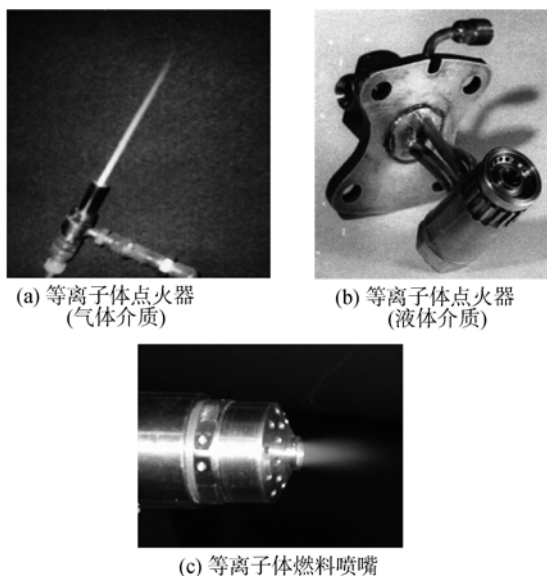


图2 等离子体点火器与等离子体燃料喷嘴的照片

Fig. 2 Photos of plasma-assisted igniters and fuel nozzle

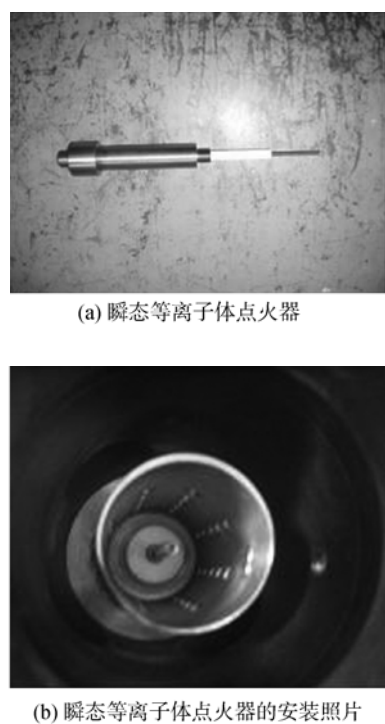


图3 美国海军研究生院研制的瞬态等离子体点火器
Fig. 3 Transient plasma igniter designed by American Naval Postgraduate School

合气,而通常认为,JP-10 燃料和空气的混合物在特征速度大于 35 m/s 的条件下是不可能被点燃的.同时发现 JP-10/空气混合气和乙烯/空气混合气的点火延迟时间明显缩短.

2009 年,Matveev 等^[27]对几种适用于高速流动条件下的等离子体点火器进行了实验研究,这

些点火器都已经接近工程应用,研制的适用于超声速燃烧室的火炬等离子体点火器如图4所示.



图4 适用于超声速燃烧室的火炬等离子体点火器
Fig. 4 Plasma torches used for supersonic chamber

2012 年,Joseph 等^[28]将日本 Imagineering 公司设计的微波放电等离子体点火器应用到四冲程、单缸内燃机上进行点火实验,在不同发动机转速、不同空气流量下测试了施加和未施加等离子体时的发动机特性,如图5所示.结果表明,微波等离子体点火可以将贫油点火边界扩大 $20\% \sim 30\%$;当过量空气系数 $A/F=17 \sim 20$ 时,微波等离子体点火的耗油率达到最小值,且可以稳定、可靠的点火,但是普通的火花塞在该工况下却很难达到这样的效果.微波等离子体点火可以极大的扩展可靠点火边界,提高燃料的燃烧效率.

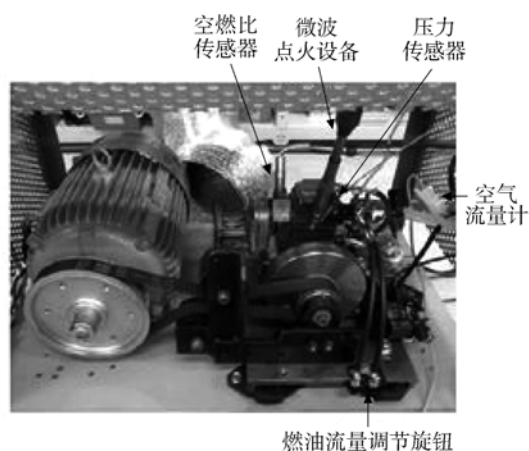


图5 微波放电等离子体点火与火花塞点火的对比实验
Fig. 5 Contrast test between microwave discharge plasma ignition and spark ignition

在国内,李智明^[29]开展了发动机等离子体点火与强化燃烧技术的先期理论与技术基础研究工作.目前已完成了功率为 0.1 kW 的脉冲式等离子点火系统的样机研制工作,在实验室进行了常规性能实验.2001 年底承担了 GT25000 舰用燃气轮机的脉冲式等离子点火系统国产化任务.

2001 年,黄铜等^[30]制造出第1台 DLZ-200 工业型等离子点火装置,如图6所示,在常温送粉的情况下,成功点燃了挥发分为 11% 的淄博贫煤.使用表明,采用等离子体点火,节约了大量的

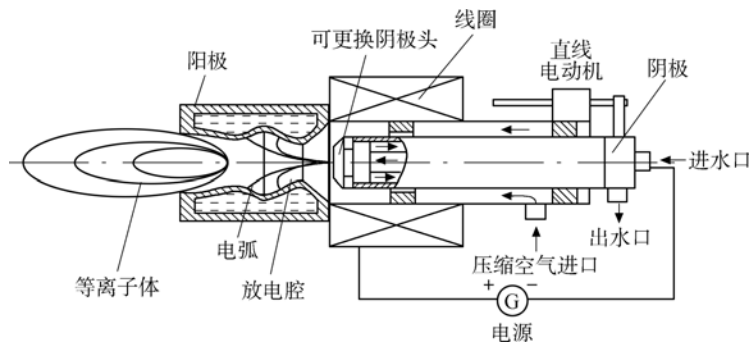


图6 DLZ-200型工业性等离子点火装置结构图

Fig. 6 Structure diagram of DLZ-200 plasma-assisted igniter

柴油,并提高了电站锅炉启动的可靠性。

2006年,宋文艳等^[31]进行了超燃冲压发动机燃烧室中可燃混合气的等离子体点火实验研究,采用等离子体点火、凹槽火焰稳定器和壁面喷射燃料等方式,实现了超声速条件下煤油的可靠点火和稳定燃烧。

2010年,兰宇丹、王峰、赵兵兵等^[32-34]对自行设计的直流航空等离子体点火器特性进行了研究,测得了点火器的放电特性和点火器喷出射流的长度、电子温度和射流温度随弧电流、氩气体积流量的变化规律,实测得点火器点火能量可以达到10J。同时,还设计了以空气为工作介质的直流和交流电弧等离子体点火器,并对其工作特性进行了研究。

2013年,李飞等^[35]使用输入功率为1.5kW的等离子体射流火炬点火器在直连式超声速实验台上成功实现了煤油的点火。实验研究了煤油喷射位置、喷射压力、工作介质气体种类对点火性能的影响。结果表明,煤油与空气的局部掺混效果对点火非常关键,而且采用 N_2 与 H_2 组合作为等离子体射流火炬点火器的工作介质气体比单纯采用 N_2 时,点火器性能更佳。

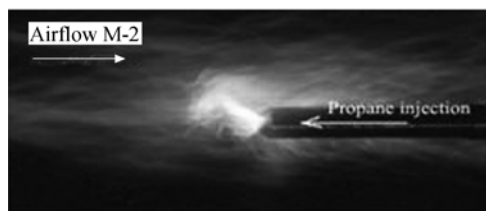
综上所述,国内外有关等离子体点火在涡轮燃气发动机、脉冲爆震发动机、超声速燃烧室、内燃机、电站锅炉等的应用验证实验结果表明,等离子体点火能够缩短点火延迟时间,增大点火能量,扩大可靠点火边界。

2.1.2 等离子体助燃的实验验证

2004年,Klimov等^[36]利用等离子体发生器形成了稳定的等离子体,进行了等离子体助燃实验。实验结果表明,等离子体助燃可使丙烷在高速气流中稳定燃烧,具有较高的燃烧稳定性。等离子体助燃实验系统及丙烷等离子体助燃实验照片如图7所示。



(a) 实验系统



(b) 丙烷等离子体助燃实验照片

图7 俄罗斯科学研究院高温研究所的等离子体助燃实验研究

Fig. 7 Experimental investigation on plasma-assisted combustion conducted by Moscow Science Institute

2005年,Stange等^[37]进行了介质阻挡放电强化丙烷/空气混合气燃烧的实验研究,图8为燃烧火焰的照片。实验表明,介质阻挡放电能明显改善燃烧火焰的形态,放电之后的火焰变得更对称、

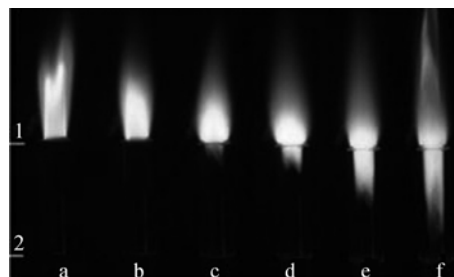


图8 介质阻挡放电强化丙烷气体燃烧的火焰照片

Fig. 8 Flame images of propane combustion initiated by dielectric barrier discharge

稳定,而且随着放电功率的升高,火焰逐渐向下伸展.这是由于在不放电和放电功率较小时火焰传播速度太小,不能克服气流向上的作用;而当放电功率增大时,火焰的传播速度增大,火焰才能向下伸展,增大火焰传播速度.

2010年, Kim等^[38]研究了纳秒脉冲放电对极贫燃甲烷/空气预混火焰(当量比为0.53)的影响.结果表明,施加等离子体激励后会形成预火焰,其温度大约500~600 K.文中指出预火焰主要包含两种成分,一种是比较稳定的燃烧中间产物,如 H_2 , CO , C_2H_2 及 H_2CO^+ ,它们的产生类似于燃料重整;另外一种是通过电子碰撞反应等生成的活性基团,活性基团产生后迅速生成中间产物参与燃烧,形成火焰的两侧边界.

2013年, Lacoste等^[39-40]首先对纳秒脉冲放电激励下的钝体燃烧器甲烷贫燃预混火焰动态响应特性进行了研究,实验中作者将纳秒脉冲放电区域设计在钝体燃烧器回流区.实验发现,和常规燃烧状态比较,施加等离子体激励后V形火焰回流区及上游位置都检测到大量的 CH^* 和 OH 基团,回流区温度也从1500 K升高到2000 K,分析这是放电产生的氮气分子激发态物种熄灭后产生的氧原子引发的结果.其次,文中还研究了纳秒脉冲放电对旋流预混火焰的影响.研究表明,施加纳秒脉冲等离子体激励后,火焰从M形火焰转变为V形火焰,且火焰变得更加紧凑;热线风速仪采集的脉动速度会下降一个数量级,说明纳秒脉冲等离子体能够有效抑制热声不稳定性.

2007年,于吉超等^[41]对低温等离子体汽油重整以及汽油机稀薄燃烧进行了研究,结果表明,汽油经旋转滑动弧等离子体重整后,产物中 H_2 与 CO 的体积分数很高,而且随重整比例的增大,汽油机稀薄极限逐渐扩大, NO 的排放量下降70%左右.

2009年,于欣等^[42]对飞秒激光强化燃烧甲烷火焰进行了研究,结果表明,当激光作用到燃烧器管口后,甲烷层流火焰传播速度增加5%~8%.2010年,罗昌金^[43]也研究了射流等离子体对火焰稳定性和火焰形态的影响,研究发现,射流等离子体能够显著改善火焰形态,使火焰高度、分离高度等参数发生改变,扩大燃料的熄火边界,还对火焰特性进行了分岔建模.

2012年,杜宏宪、赵兵兵等^[44-45]测量了氩气/空气等离子体助燃激励器的特性,同时采用介质阻挡放电在燃烧实验段中产生等离子体,进行了

等离子体助燃条件下丙烷/空气混合气燃烧过程影响因素及其规律的实验研究.实验结果表明:等离子体助燃时, O_2 的体积分数和 CO 的浓度变化速率增大;稳定燃烧后 O_2 和 CO 体积质量分数小于常规燃烧的,燃烧效率提高;减小放电电压,增大空气、丙烷流量,等离子体助燃的效果减弱.

2010年,汤洁等^[46]基于环形结构介质阻挡放电的特点,提出了提高燃烧效率的非平衡等离子体发生器主体结构方案,设计了等离子体发生器,并开展了丙烷燃烧实验,结果表明非平衡等离子体在很大程度上能够改善有机燃料的燃烧状况,使之燃烧得更加充分,有效地验证了非平衡等离子体增强燃烧技术应用于提高燃烧效率的可行性.同时,他们还尝试将非平衡等离子体增强燃烧技术应用到汽车发动机系统中^[47].将汽化后的柴油经过等离子体发生装置,再从喷嘴流出,点燃燃烧,观察等离子体发生装置开启与关闭状态下燃烧火焰的物理特征,并检测柴油燃烧后尾气中物质组分的变化.对尾气成分的检测表明非平衡等离子体可以促进柴油进一步燃烧,使得柴油中有更多的碳氢氧化生成 CO , CO_2 和 H_2O ,并减少 HC 颗粒和 NO 的排放量,验证了非平衡等离子体增强柴油燃烧的可行性.

2011年,胡宏斌^[48]设计了一种适用于助燃低热值气体燃料燃烧的等离子体发生装置,利用该装置产生的等离子体对低热值气体燃料进行助燃,研究了低热值气体燃料的点火性能、熄火极限、火焰传播速度、燃烧效率、火焰形态等参数在等离子体助燃影响下的变化规律,并结合目前燃气轮机中普遍采用的旋流扩散火焰技术,进一步设计了能够助燃旋流火焰的等离子体发生装置,研究了旋流火焰在等离子体助燃下的助燃特性.

综上所述,国内外有关等离子体助燃在甲烷、丙烷等烷烃燃料,低热值气体燃料和汽油、柴油燃烧的应用验证实验结果表明,等离子体助燃能够增强火焰稳定性,提高燃烧效率,减少污染物排放等.

2.2 等离子体强化燃烧的作用机制

Starikovskiy等^[49]指出,应用气体放电形成等离子体来强化燃烧的机制主要有热机制与非热机制两类.热机制主要包括两点:①能量释放引起的气体加热加速化学反应的进行;②不同类型的气体加热产生流体扰动,从而形成紊流,加快燃料与新鲜混合气的掺混.非热机制主要包括以下几

点:①电子与离子在电场的作用下产生漂移,在该过程中又与活性粒子发生碰撞,形成活性粒子的附加通量;②离子风效应(ionic wind effect)(电场对气流的动量运输);③电子与气体分子之间的碰撞引起气体分子的激发、离解与电离,形成非平衡活性物种,改变了燃料燃烧的动力学机理.这些因素可以单独或共同发挥作用,控制、强化燃料的燃烧. SUN, Ombrello 等^[50-51]也分析了等离子体强化燃烧的作用机理,并将其总结为热强化、输运强化与动力学强化.

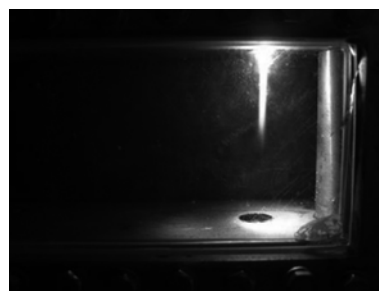
在国内,空军工程大学何立明领导的课题组率先开展航空发动机燃烧室等离子体点火与助燃技术的探索性研究,提出了等离子体点火与助燃的宏观作用机制^[52]. 等离子体点火的宏观作用机制是高温效应、射流效应、化学效应;等离子体助燃的宏观作用机制是化学效应、气动效应、温升效应. 但是,对于等离子体强化燃烧微观作用机理的研究,至今国内外都没有相关报道.

2.2.1 等离子体点火的作用机制

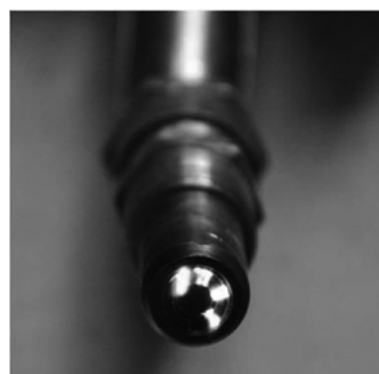
等离子体点火的高温效应是指等离子体点火器内电弧放电产生的焦耳热对工作介质加热形成高达 5 000 K 的高温射流,在点火瞬间使射流周围区域的可燃混合气温度急剧升高,形成较大区域的活化中心,加速点火过程. Lance 等^[53]的研究表明,2 kW 的等离子体点火器可以产生温度达到 5 000 K 的高温高活性气体,并且在马赫数为 2,总温为 590 K、总压为 545.4 kPa (5.4 atm) 时的乙烯和 JP-7 燃料火舌中会产生大量活性粒子 OH. Barkhudarov 等^[54]研制了一种轴对称环形放电器,可以用于燃料的点火与气体的加热等. 根据推算,当该环形放电器直径为 5 cm,输入能量为 200 J 时,放电器中心位置附近的温度可以达到 6 000 K,可以将其布置到凹腔燃烧室中作为点火装置使用.

等离子体点火的射流效应是指等离子体点火器喷出的高温高速射流穿透燃料/空气混合气时的卷吸和掺混作用,可以增强燃烧室内燃料与空气的混合,增大火舌与混合气的接触面积,在燃烧室中心区域形成点火中心,从而加速点火过程. 图 9 中给出了等离子体点火射流与电火花放电的对比图片^[52],可以发现,等离子体点火器喷出的射流长度较长,比电火花点火器的表面放电更具优势. Scott 等^[55]的研究表明,等离子体炬的射流速度很高,具有较好的穿透效果,可以强化点火能

力. Kiyotaka, Takita 等^[56-57]的研究表明,等离子体射流的温度高、速度快,富含活性粒子、穿透距离大.



(a) 等离子体点火射流



(b) 电火花放电

图9 等离子体点火射流与电火花放电的对比照片

Fig. 9 Difference between plasma jet and spark discharge

等离子体点火的化学效应是指等离子体点火器内的工作介质气体放电会产生大量活性粒子(如激发态粒子、带电粒子、活性基等),增加活化中心附近的活性粒子浓度,提高活化中心的化学反应速率,加速点火过程. Naveen 等^[58]研究发现,CH₄/air, C₂H₂/air, CO/air 等混合物中通过气体放电加入活性粒子可以减小点火能量和点火延迟时间,而且活性粒子对高速可燃混合物的大体积点火很重要. Aleksandrov, Kosarev, Nikipelov 等^[59-62]研究了 C_nH_{2n+2}: O₂: Ar 混合气高压纳秒放电点火的动力学,并且测量了点火延迟时间,实验结果表明,放电中分子分解产生的原子和活性粒子会影响链锁反应速率,导致点火延迟时间大大缩短.

2.2.2 等离子体助燃的作用机制

等离子体助燃的化学效应就是利用非平衡等离子体放电产生的化学活性粒子提高燃料的着火性能及燃烧特性,实质是等离子体放电中高能电子与中性粒子间的碰撞引发重粒子的离解、激发甚至电离,产生大量的活性粒子,从而影响燃烧系

统的化学平衡,加速燃烧的化学动力学过程. Klimov等^[17]的研究表明,燃料/空气混合气放电产生的活性基和活性分子能加快燃烧化学反应,活性基(O, H, OH, NO, CN)和激发态活性分子在燃烧化学动力学过程中起重要作用. Zhukov等^[63]研究发现,在纳秒脉冲介质阻挡放电中,流注头部产生了大量的O和OH等活性粒子,O, H和OH等活性粒子对燃烧加速和火焰传播速度的增大起主要作用,最大火焰传播速度增加2倍. Klimov等^[64]进行了丙烷/空气混合气的等离子体助燃实验,混合气放电中产生了H₂, CO, C₂H₂, CH₄, C₆H₆等粒子,燃烧完全度90%~100%,测量表明活性粒子能提高大流速下混合气的燃烧温度,等离子体助燃时混合气的富油极限扩展了2~4倍,贫油极限减少了1/3~1/2. Ombrello小组^[65]实验研究了等离子体助燃的机理,结果表明等离子体通过产生活性基、激发态粒子,离子和电子及提高温度,将放电能量耦合到燃烧过程中,产生的活性粒子会改变燃料的化学反应速率,加快燃烧反应,强化燃烧过程. Yoshinori, Matsubara等^[66-67]分别利用介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体和等离子体火炬强化超声速燃烧,他们认为DBD强化燃烧的主要机理是放电产生的O₃.

等离子体助燃的温升效应是指助燃激励器放电过程引起的燃烧室气流温度升高对燃烧过程中化学反应进程的影响,可以减小点火需要的最小点火能量和活性粒子密度,增强燃烧的稳定性. Leonov等^[68]的研究发现,等离子体助燃中的燃烧室流场局部温度升高会导致这个区域的燃烧强化,影响流场结构,甚至可以在高能量释放区域产生气流分离,增强空气与燃料的混合,增加局部驻留时间和局部燃烧效率. Michael等^[69]的甲烷-空气混合气纳秒脉冲放电等离子体助燃实验表明,非平衡等离子体放电中的一部分能量使大量燃料分解,还有一部分能量用于加热. Mintusov等^[70]的研究表明,在相同放电条件下,与氮气-燃料放电中燃料分解的比例和温度相比,空气-燃料流放电时温度上升更高,这是由于等离子体放电中活性粒子的存在导致燃料氧化并释放热量,使着火温度接近自着火温度而导致点火发生.

等离子体助燃的气动效应是通过带电粒子在空间不均匀电场中的定向运动^[71]和等离子体的不稳定性^[72],向燃烧室流场中的中性气体粒子传递动量和能量而形成的“粒子的集体运动行为”,

其中电场力起主要作用^[73-75]. Klimov等^[76]研究表明,等离子体放电可形成声波和紊流,对燃料与空气接触的混合面产生扰动,增大燃料的输运速度(高达1000 m/s),促进燃料与空气混合,增加气流紊流度. Aleksandrov等^[77]实验表明,等离子体助燃激励器放电可以影响流场的压力和温度的分布特性,认为这是源于带电粒子受电场力而产生的等离子体旋涡和紊流,紊流能增强扩散和反应物混合. Yarantsev等^[78]研究表明,在高速流中等离子体放电产生的局部加热可以产生局部激波,可在不同介质中促进燃料与空气的混合,强化附近区域的化学反应,控制能量分布,改变流场结构,而且放电中存在各种类型的等离子体非稳定性,使用足够的放电能量可实现流动分离,增加局部驻留时间,强化局部流动混合和燃烧. 姜春阳等^[79]关于介质阻挡放电边缘电场对甲烷燃烧强化影响的研究表明,经过放电区的气体燃料在边缘电场最强处开始与内电极铜管中流出的空气相互混合,边缘电场中的径向电场分量将对放电区流出的燃料等离子体射流中的带电粒子施加电场力的作用,加速燃料和空气的混合速度. 兰宇丹等^[80]建立了燃烧室助燃激励器中等离子体气动效应的数值仿真模型,对助燃激励中的等离子体气动效应诱导燃烧室空气流动进行了数值模拟. 计算结果表明,在等离子体气动效应的作用下,燃烧室流场紊流度增大,速度分布不均匀;随着激励电压的升高,燃烧室轴向速度振荡幅度增大;等离子体气动效应对燃烧室流场的影响随着进口流速的增加不断减小;随着电荷密度的增加,火焰稳定器前后燃烧室流场轴向速度的振荡不断加剧.

2.3 等离子体强化燃烧仿真研究

等离子体强化燃烧仿真研究主要包括等离子体激励过程与强化燃烧过程的数值模拟. 等离子体激励过程研究主要关心各参数对等离子体放热、活性粒子激发浓度、等离子体温度、体积力等的影响,而强化燃烧过程研究则更关心等离子体参数对燃烧过程的影响,主要指的是对燃烧化学动力学、点火延迟、点火可靠性、火焰稳定性、燃烧效率、稳定燃烧范围和污染物排放量的影响. 等离子体强化燃烧过程涉及等离子体动力学与燃烧动力学的交叉融合,是一个典型的空间、时间上的多尺度问题(如图10),计算的自由度大(各种物质),存在电子能量与电磁场的强耦合,化学反应(激发反应、电离反应、光致电离、熄灭反应、复合反应、电荷交换反应和大分子基团反应等)、物理

过程(光电离、等离子体鞘层、流体流动等)复杂,对网格质量、离散格式、求解方法等都有严格的要求.而且,现如今与其相关的化学动力学机理、碰撞截面数据、反应速率系数等并不完备,缺乏相应的数据支撑,所以此方面的研究尚需发展.国外在等离子体强化燃烧仿真研究中已经有了一定的基础,取得了较大的发展,而国内至今没有等离子体强化燃烧多场耦合方面的报道,都只是将等离子体的作用以等效加热区、粒子源项的形式直接加入到流体运动方程和组分输运方程中,没有建立等离子体强化燃烧的多场耦合模型.

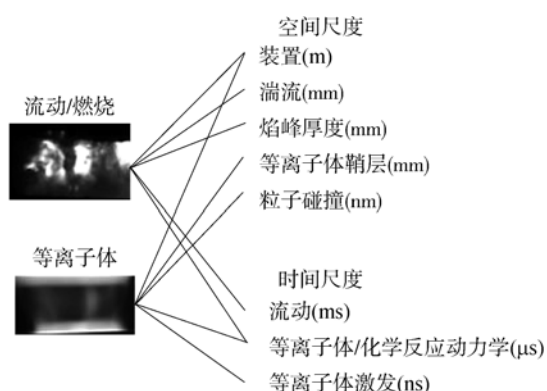


图10 等离子体强化燃烧多场耦合中的多尺度现象

Fig. 10 Phenomenon of various scales in coupled fields of plasma-assisted ignition and combustion

国外有关等离子体强化燃烧仿真研究的成果主要包含三个方面.第一,等离子体放电的模拟.研究等离子体放电的放电过程和电场强度、电子密度、电子能量、活性粒子浓度、放热量等的变化.第二,单独研究等离子体强化燃烧的某一种作用机制.主要是研究特定的某种活性粒子对燃烧的强化作用效果和等离子体放电引起的动量输运特性.第三,等离子体强化燃烧的多场耦合建模.研究等离子体放电对点火过程、点火延迟时间、火焰传播速度等的影响.

Moon 等^[81]采用一维模型,在常压、空气温度为 340 K 的条件下,对纳秒脉冲介质阻挡放电装置中空气等离子体的形成过程进行了数值模拟.结果表明,当电子从氧负离子脱离时,等离子体就开始形成,而且阴极表面电荷的积累与二次电子发射会导致等离子体鞘层的退化.阳极附近首先形成离子锋面并逐渐加强,然后逐渐向阴极移动.这与流注放电的过程完全相同,较好的模拟了纳秒脉冲空气介质阻挡放电过程.

Sharath 等^[82]使用详细的化学反应机理,在零维模型条件下研究了非平衡纳秒脉冲放电对空气、氢气/空气与乙烯/空气混合气放电的影响,进而分析了等离子体强化燃烧中的化学与输运特性.当使用空气介质时,输入的大部分脉冲能量都用于氮气分子的振动、电子激发和氧气分子的解离;当使用氢气/空气混合气放电时,氢气分子的解离成为主要反应,而氧气分子的解离变得微弱;当使用乙烯/空气混合气放电时,会形成更小的烃基链式反应,而且输入的脉冲能量主要用于氢原子的形成.由此研究可以看出,使用不同的气体作为等离子体放电的工作介质会发生不同的物理化学过程,强化燃烧的特性也有不同.

Aleksandrov 等^[83]使用复杂碳氢化合物的电子碰撞截面数据,对碳氢化合物在高压纳秒脉冲放电下活性粒子的产生与等离子体点火过程进行了模拟.结果表明,非平衡高压纳秒脉冲放电产生的活性粒子中绝大部分为氧原子,而且会引起附加气体加热.气体加热对于高压纳秒脉冲等离子体点火并不重要,因为此时的电场强度值适中,如果约化电场强度非常高(达到 $10^{-14} \text{ V} \cdot \text{cm}^2$ 数量级),这种快速的气体加热效应会非常显著.

Langer 等^[84]建立了非平衡等离子体流注放电一维数值模型,研究了约化电场强度和电子密度对氢气/空气混合气点火的影响.将能量源项分解为热能源项与非平衡能量源项两部分,分析了等离子体放电中的能量因素.结果表明,当没有非平衡能量时,放电区域的温度较低,因而 O, H, OH 的摩尔分数大约能增加一个量级,但是点火延迟时间会增加.若点火时使用非平衡等离子体,那么它所需的总能量输入相对降低.在某一固定的约化电场强度下,若电子密度足够大,热能源项的作用会削弱,不再成为实现点火的必要条件.而且,当放电区域温度升高时,等离子体放电释放的能量减小.该研究有助于理解重复流注放电等离子体点火过程.

Starikovskii 等^[85]建立了直流电场作用下甲烷/空气混合气层流预混火焰的一维与二维模型,研究了电场作用下产生的体积力对火焰结构等的影响.一维模拟结果说明电场作用后火焰锋面的温度梯度下降,二维模拟得到电场作用后燃料的燃烧完全度提高、废气中 CO_2 的体积分数降低.等离子体助燃的气动效应主要表现在电场作用下体积力对流场的影响,会对流场产生扰动,增强燃料与空气的混合、焰锋与新鲜混合气的接触面积,

强化燃料的燃烧,较好的模拟了这一过程,但还需发展自适应程度高的三维模型。

Takana 等^[86]以单介质阻挡平板型激励器为研究对象,采用甲烷/空气混合气放电的简化机理,研究了环境压力为 101~303 kPa(1~3 atm)与温度为 300~500 K,对甲烷/空气混合气介质阻挡放电中的流注动力学过程与活性粒子的时空演化特性进行了数值模拟研究。文中发现,环境压力与温度对化学反应的影响主要体现在介质阻挡放电中活性粒子的产生过程。当约化电场强度给定时,总的气体密度对活性粒子的产生特性影响很大,而且随着环境压力的升高、气体温度的降低,活性粒子的浓度会增大。结合等离子体强化燃烧的实际应用需求,对高气压、高温条件下的活性粒子产生特性进行研究,更加贴近燃烧室等离子体强化燃烧的实际工况,不足的就是模拟时气流为静止状态,且对等离子体放热没有计算。

Breden 等^[87]综合求解双温度等离子体模型与可压缩 Navier-Stokes 方程,模拟了大气压氦等离子体射流喷向固体介质时与流场的相互作用过程,得到了氦等离子体射流对固体介质的活性粒子通量与带电粒子通量大小及其影响因素。采用的化学反应机理非常复杂,包括 31 种组分、136 个化学反应;分解计算区域,划分了等离子体模块与流体模块的求解范围;考虑了等离子体与流体耦合时存在的时间、长度的多尺度问题,采用不同的网格划分方法、时间步长、离散格式、求解策略来解决。但是忽略了氦光子对电离反应的贡献,光电离源项不准确,而且放热的计算不精确,等离子体放电过程模拟还有待发展。如果能在此项研究的基础上考虑化学反应与传热传质,那么有可能建立起比较可靠的等离子体强化燃烧多场耦合模型。

和国外相比,国内在等离子体强化燃烧仿真研究方面的工作较少,现有成果也都没有实现等离子体激励过程与燃烧过程耦合求解,而是将等离子体的作用直接以等效加热区、活性粒子源项的形式加入流动方程,没有详细地考虑等离子体的激励过程。但是,在等离子体放电数值模拟研究方面国内有突破。

郑洪涛、穆勇等^[88-89]用等效加热区代替产生欧姆热的电弧,对等离子体点火器内的层流流动进行了数值模拟。模拟结果表明:适当地增大进口空气速度,有利于降低等离子体点火器内部高温区的温度,减少等离子体点火器内部材料的烧蚀,但会

导致喷嘴出口气流平均温度下降;等离子体点火器喷出的高温和含有较多活性物质的射流,能够强化主燃料炬的燃烧,并且可以通过改变余气系数来提高燃烧室出口流场中活性物质的体积分数。

孔凡杰^[90]通过构造反映等离子体点火器内部流动规律的基本方程组,建立了描述等离子体点火器内复杂燃烧过程的数学模型,并对其进行了三维模拟仿真,讨论了改变过量空气系数对等离子体点火器出口燃气混合物组分、内能、化学能、出口点火能量的影响,并对燃烧组分变化对等离子体点火器出口处上述参数的影响作了分析。

杨家龙等^[91]建立了适用于燃气轮机的连续弧等离子体点火器稳定电弧的有限元数学模型,采用多物理场耦合的方法计算了等离子体弧的温度场、电磁场、速度场以及电极表面的电流密度,结果表明,连续弧等离子体点火发生器可以实现小电流激发空气等离子体并获得稳定的等离子体射流火焰,满足燃气轮机可靠点火的要求。

朱益飞等^[92-94]建立了纳秒脉冲介质阻挡放电(NSDBD)等离子体气动激励多场耦合模型,对等离子体气动激励的放电等离子体、能量传递和流场响应特性开展系统的建模仿真研究,首次实现了二维条件下放电、等离子体和流体的多时间/空间尺度耦合仿真,将等离子体放电、能量传递和流体响应过程融合在一起,得到了基于放电过程的随时间变化的空间热源分布,进而得到了更为精准的温度场、压力场和速度场响应特性。此项工作对等离子体强化燃烧多场耦合模型的建立具有非常好的借鉴意义。

于锦禄等^[95]建立了纳秒脉冲放电非平衡等离子体放电的零维模型,研究了气体压力对空气等离子体放电产物氧原子、臭氧分子、激发态氮分子和 NO 分子最大粒子数密度的影响规律。

杜宏亮等^[96-98]在不同的放电时间、约化场强、初始电子浓度、温度、放电频率等条件下,计算分析空气放电等离子体中的活性粒子浓度的演化规律。以 CH₄/空气混合气为燃料,对单管燃烧室中的燃烧过程进行模拟^[99],在不同电离度条件下,分析了非平衡等离子体中起主要作用的活性粒子(O, H)和活性基(OH)对 CH₄/空气混合气燃烧的影响。结果表明,与传统燃烧相比,等离子体助燃技术可以提供燃烧开始的自由基,加快链锁反应的进行,提高燃烧温度、降低污染物排放,改善燃烧室出口流场的分布。

兰宇丹等^[100]对不同初始温度下 H₂/O₂ 混合

物等离子体中主要粒子随时间发展的演化规律进行了数值模拟,得到了放电后等离子体中主要带电粒子和中性粒子密度随时间的变化规律. 计算结果表明, H_2/O_2 混合物等离子体中主要活性粒子密度随时间的增加减小, 化学反应达到平衡所需的时间随初始温度升高逐渐减少.

3 总结与展望

国内外在等离子体强化燃烧领域的研究已经取得了丰硕的成果, 为后续研究和工程应用奠定了坚实的基础, 但是仍然有很多难点需要解决, 主要是等离子体强化燃烧的机理、等离子体强化燃烧的多场耦合建模与数值仿真、测试诊断技术以及其他科学与技术问题. 揭示等离子体激励与燃烧动力学(流动、传热传质、化学反应、电场力等)多场耦合作用机制, 是其中内含的最重要的科学问题, 同时它是等离子体强化燃烧工程应用及提高效率的基础.

为了阐明等离子体强化燃烧的机理, 需要设计更加准确、可靠、清晰的实验方案, 建立准确描述的数学模型. 首先必须明确燃烧现象的边界条件, 然后再定量地测量数据. 研究等离子体强化燃烧机理, 就是要定量研究等离子体点火的高温效应、化学效应、射流效应, 揭示等离子体点火的机理; 定量研究等离子体助燃的化学效应、气动效应、温升效应, 揭示等离子体助燃的机理. 等离子体点火(或助燃)的3种效应分别如何影响点火过程(或燃烧过程)? 等离子体点火(或助燃)的3种效应中哪一种最重要、贡献最大? 探究不同效应强化燃烧的影响规律, 获得影响强化燃烧效果的主要效应, 才能为等离子体激励器设计、强化燃烧控制方法优化等提供依据. 但是, 实施等离子体点火或助燃时, 这些效应是共同作用的, 无法将其孤立起来分别研究, 要研究某一种效应对强化燃烧的影响, 就必须进行系统的实验设计, 综合考虑各方面因素. 其中一种方法就是可以通过定量研究等离子体点火、助燃的3种效应, 分别建立各效应与点火特性(点火能量、点火延迟时间、可靠点火边界)、助燃特性(燃烧效率、稳定燃烧范围、污染物排放)之间的关系来研究等离子体强化燃烧的微观作用机理.

等离子体强化燃烧的多场耦合建模与仿真研究对于阐释强化燃烧机理极其重要. 虽然从空间或时间上解除等离子体与燃烧过程之间的耦合关系, 可以大大简化问题, 也有助于分析等离子体强

化燃烧的作用机制与内在的强化因素, 但是首先必须研究等离子体与燃烧过程耦合作用下的基本规律, 其结果与解耦条件下不同. 所以, 等离子体强化燃烧详细动力学模型的研究与发展、强化燃烧的多场耦合建模与仿真研究是至关重要的, 国内在这方面与国外有较大差距.

测试诊断技术对于等离子体强化燃烧研究是必不可少的. 必须应用先进的测试诊断设备、发展新型测试技术来研究复杂的等离子体强化燃烧过程. 国外已经建有非平衡等离子体强化燃烧测试诊断系统^[10], 主要包括粒子图像测速仪(PIV)、具有增强器的高速 ICCD 相机(PI-MAX)、红外激光二极管等, 但是国内尚没有相关报道, 急需跟进硬件条件的建设.

为了加快推进等离子体强化燃烧技术在航空发动机燃烧室中的应用, 还需要解决一些技术问题. 例如, 需要优化等离子体点火器和助燃激励器的几何结构、激励参数, 以及在燃烧室中的布局形式、施加方式等, 来提高等离子体激励的能量转换效率和燃烧强化效果, 需要探索高效能等离子体强化燃烧的控制方法, 需要考虑等离子体点火与助燃应用到不同类型发动机燃烧室时的匹配问题等, 特别是等离子体点火驱动电源和助燃激励电源的小型化与轻型化问题.

参考文献:

- [1] 陈佳洱. 等离子体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [2] Roth J R. Industrial plasma engineering: Vol. 1 principles [M]. London: Institute of Physics Bristol, 2001.
- [3] SUN Wenting. Non-equilibrium plasma-assisted combustion [D]. Princeton, New Jersey: Princeton University, 2013.
- [4] Starikovskiy S M. Topical review: plasma-assisted ignition and combustion[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16): 265-299.
- [5] Starikovskiy A, Aleksandrov N. Plasma-assisted ignition and combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2013, 39(1): 61-110.
- [6] Starikovskaia S M, Starikovskiy A Y. Plasma assisted ignition and combustion[M]. London: Wiley, 2010.
- [7] Popov N A. The effect of nonequilibrium excitation on the ignition of hydrogen-oxygen mixtures[J]. High Temperature, 2007, 45(2): 261-265.
- [8] Merola S S, Marchitto L, Tornatore C, et al. Optical characterization of combustion processes in a DISI engine equipped with plasma-assisted ignition system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 69(1): 177-187.
- [9] Sun W T, Uddi M, Won S H, 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.
- [10] Hammack S, Lee T, Carter C. Simultaneous planar OH imaging of microwave plasma enhanced combustion at 10 kHz[R]. AIAA-2012-0243, 2012.
- [11] Altendorfer F, Kuhl J, Zigan L, et al. Study of the influence of electric fields on flames using planar LIF and PIV techniques[J]. *Proceedings of Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3195-3201.
- [12] Ganguly B N. Hydrocarbon combustion enhancement by applied electric field and plasma kinetics[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2007, 49(12B): 239-246.
- [13] Ombrello T, Won S, Ju Y G, et al. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: Part I effects of O_3 [J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(10): 1906-1915.
- [14] Ju Y G, Ombrello T, Fridman A. Development of non-equilibrium plasma-flame kinetic mechanism and its validation using gliding arc integrated with counterflow burner[R]. Princeton, New Jersey: Princeton University, 2010.
- [15] 严传俊, 范玮. 燃烧学[M]. 2 版. 西安: 西北工业大学出版社, 2005.
- [16] Leonov S B, Yarantsev D A, Napartovich A P, et al. Plasma-assisted ignition and flameholding in high-speed flow [R]. AIAA-2006-0563, 2006.
- [17] Klimov A, Bityurin V, Brovkin V, et al. Optimization of plasma assisted combustion[R]. AIAA-2002-0146, 2002.
- [18] Rao X, Hemawan K, Wichman I, et al. Combustion dynamics for energetically enhanced flames using direct microwave energy coupling[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2011, 33(2): 3233-3240.
- [19] Bellenoue M, Labuda S, Ruttun B, et al. Spark plug and corona abilities to ignite stoichiometric and lean methane/air mixtures[J]. *Combustion Science and Technology*, 179(3): 477-496.
- [20] Laux C O, Spence T G, Kruger C H, et al. Optical diagnostics of atmospheric pressure air plasmas [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2003, 12(2): 125-138.
- [21] Ono R, Yamashita Y, Takezawa K, et al. Behaviour of atomic oxygen in a pulsed dielectric barrier discharge measured by laser-induced fluorescence [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(16): 2812-2816.
- [22] Czemichowski A. Gliding arc applications to engineering and environment control[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 1994, 66(6): 1301-1310.
- [23] Krasnochub A V, Vasilyak L M. Dependence of the energy deposition of a fast ionization wave on the impedance of a discharge gap[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 34(11): 1678-1682.
- [24] Ombrello T. Plasma-assisted combustion: systematic decoupling of the kinetic enhancement mechanisms of ignition, flame propagation, and flame stabilization by long-lifetime species[D]. Princeton, New Jersey: Princeton University, 2009.
- [25] Matveev I. Non-equilibrium plasma igniters and pilots for aerospace application[R]. AIAA-2005-1191, 2005.
- [26] Charles N H. Ignition characteristics for transient plasma ignition of ethylene/air and JP-10/air mixtures in a pulse detonation engine [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007.
- [27] Matveev I, Matveeva S, Kirchuk E, et al. Development and experimental investigations of high power hybrid plasma torches[R]. Reno, Nevada, USA: 5th International Workshop and Exhibition on Plasma Assisted Combustion (IWEPAC), 2009-1029, 2009.
- [28] Joseph K L, Ju Y G, Tsuruoka R, et al. A study of plasma-assisted ignition in a small internal combustion engine[R]. AIAA-2012-1133, 2012.
- [29] 李智明. 等离子体发生器化学反应流场数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.
- LI Zhiming. Numerical simulation of chemistry reaction flow field in plasma generator[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2003. (in Chinese)
- [30] 黄铜, 叶玲, 牛涛, 等. 等离子点火燃烧装置—电站燃煤锅炉节能环保新技术[J]. *节能技术*, 2001, 21(3): 25-27.
- HUANG Jian, YE Ling, NIU Tao, et al. Combustion device sustained by plasma-assisted ignition—the new technology of energy conservation for coal burning boiler [J]. *Energy Conservation and Environment Protection*, 2001, 21(3): 25-27. (in Chinese)
- [31] 宋文艳, 刘伟雄, 贺伟, 等. 超声速燃烧室等离子体点火实验研究[J]. *实验流体力学*, 2006, 20(4): 20-24.
- SONG Wenyan, LIU Xiongwei, HE Wei, et al. Experimental investigation of plasma ignition in supersonic combustor[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2006, 20(4): 20-24. (in Chinese)
- [32] 兰宇丹, 何立明, 丁伟, 等. 直流航空等离子体点火器射流特性分析[J]. *高电压技术*, 2010, 36(11): 2772-2776.
- LAN Yudan, HE Liming, DING Wei, et al. Analysis on characteristics of DC electric aircraft plasma ignitor jet[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(11): 2772-2776. (in Chinese)
- [33] 王峰, 何立明, 兰宇丹, 等. 直流电压等离子体点火器点火特性研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(9): 2505-2507.
- WANG Feng, HE Liming, LAN Yudan, et al. Study on ignition characteristic of DC voltage plasma ignitor[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(9): 2505-2507. (in Chinese)
- [34] ZHAO Bingbing, HE Liming, DU Hongliang, et al. Electrical characteristics of alternating current plasma igniter in airflow[J]. *Plasma Science and Technology*, 2014, 16(4): 370-373.
- [35] LI Fei, YU Xilong, TONG Yinggang, et al. Plasma-assisted ignition for a kerosene fueled scramjet at Mach 1.8[J].

- Aerospace Science and Technology, 2013, 28(1): 72-78.
- [36] Klimov A, Bitururin V, Kuznetsov A, et al. External and internal plasma assisted combustion[R]. AIAA-2004-0146, 2004.
- [37] Stange S, Yongho K, Ferreri V, et al. Flame images indicating combustion enhancement by dielectric barrier discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(2): 316-317.
- [38] Kim W, Mungal M G, Mark A, et al. The role of in situ reforming in plasma enhanced ultra lean premixed methane/air flames[J]. Combustion and Flame, 2010, 157(2): 374-383.
- [39] Lacoste D A, Xu D A, Moeck J P, et al. Dynamic response of a weakly turbulent lean-premixed flame to nanosecond repetitively pulsed discharges[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3259-3266.
- [40] Lacoste D A, Moeck J P, Durox D, et al. Nanosecond repetitively pulsed discharges on the dynamics of a swirl-stabilized lean premixed flame [R]. ASME Paper GT2013-0526, 2013.
- [41] 于吉超. 低温等离子体汽油重整及对汽油机稀薄燃烧影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
YU Jichao. Research on cold plasma gasoline reforming and the influence on lean burn engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)
- [42] 于欣, 邵强, 彭江波, 等. 激光激活氧分子作用下 CH_4/O_2 反应数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2009, 15(6): 485-490.
YU Xin, SHAO Qiang, PENG Jiangbo, et al. Numerical simulation of CH_4/O_2 reaction by laser activation of oxygen molecule [J]. Combustion Science and Technology, 2009, 15(6): 485-490. (in Chinese)
- [43] 罗昌金. 射流等离子体作用下火焰特性及稳定性的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
LUO Changjin. Experimental study of characteristic and stability of flames with plasma jet [D]. Habin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [44] 杜宏亮, 何立明, 丁伟, 等. 氩气/空气等离子体助燃激励器的实验研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 293-296.
DU Hongliang, HE Liming, DING Wei, et al. Experimental investigation on plasma assistant combustion actuator in argon/air[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(2): 293-296. (in Chinese)
- [45] 赵兵兵, 张鹏, 何立明, 等. 等离子体助燃对燃烧产物影响的实验[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1974-1978.
ZHAO Bingbing, ZHANG Peng, HE Liming, et al. Experiments of plasma assisted combustion's effect on combustion products[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1974-1978. (in Chinese)
- [46] 汤洁, 段忆翔, 赵卫, 等. 介质阻挡放电增强引擎燃烧技术的初步研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 733-738.
TANG Jie, DUAN Yixiang, ZHAO Wei, et al. Study of dielectric barrier discharge nonequilibrium plasma-assisted combustion for more efficient engine [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 733-738. (in Chinese)
- [47] 汤洁. 非平衡等离子体增强燃烧的光谱诊断研究[D]. 北京: 中国科学院, 2011.
TANG Jie. Diagnostic investigation on nonequilibrium plasma-assisted combustion with optical emission spectroscopy[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [48] 胡宏斌. 非平衡等离子体助燃低热值气体燃料的实验研究[D]. 北京: 中国科学院, 2011.
HU Hongbin. Experimental investigation of non-equilibrium plasma assisted combustion of low BTU fuels[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [49] Starikovskiy A, Aleksandrov N, Rakitin A. Plasma-assisted ignition and deflagration-to-detonation transition[R]. AIAA-2012-0829, 2012.
- [50] 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: 3211-3218.
- [51] Ombrello T, Won S H, Ju Y G, et al. Flame propagation enhancement by plasma excitation of oxygen: Part II effects of $\text{O}_2(a^1\Delta_g)$ [J]. Combustion and Flame, 2010, 157(10): 1916-1928.
- [52] 兰宇丹. 燃烧室等离子体点火与助燃的数值仿真与实验研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2011.
LAN Yudan. Experimental investigation and numerical simulation of chamber plasma assisted ignition and combustion [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [53] Lance J, Campbell C, Robert B, et al. Toward plasma-assisted ignition in scramjets[R]. AIAA-2003-871, 2003.
- [54] Barkhudarov E M, Tarasova N M, Temchin S M, et al. An axisymmetric electric discharge as a means for remote heating of gas and for ignition of combustible gas mixture [J]. High Temperature, 2010, 48(5): 620-628.
- [55] Scott G, Lance J, Walter O, et al. Geometric studies of anodes for use with low power, uncooled plasma torches[R]. AIAA-2003-0833, 2003.
- [56] Kiyotaka S, Ryoichi K. Two stage plasma torch ignition in supersonic airflows[R]. AIAA-2001-3740, 2001.
- [57] Takita K. Ignition and flame-holding by oxygen, nitrogen and argon plasma torches in supersonic airflow[J]. Combustion and Flame, 2002, 128(3): 301-313.
- [58] Naveen C, Rod M, Adam H, et al. Non-thermal ignition of premixed hydrocarbon-air and CO-air flows by nonequilibrium RF plasma[R]. AIAA-2004-835, 2004.
- [59] Aleksandrov N L, Ivanov G V, Kindusheva S V, et al. Kinetics of plasma assisted ignition at elevated temperatures experiments and modeling [R]. AIAA-2008-1363, 2008.
- [60] Kosarev I N, Aleksandrov N L, Kindysheva S V, et al.

- Kinetic mechanism of plasma-assisted ignition of hydrocarbons[R]. AIAA-2008-5068, 2008.
- [61] Nikipelov A, Rakitin A, Starikovskii A. Low-temperature plasma chemistry and plasma assisted partial oxidation [R]. AIAA-2009-0224, 2009.
- [62] Aleksandrov N L, Kindusheva S V, Kosarev I N, et al. Analysis of energetic efficiency and kinetics of intermediates in the problem of plasma assisted ignition[R]. AIAA-2009-0692, 2009.
- [63] Zhukov V P, Starikovskii A Y, Starikovskaia S M, et al. Control of combustion and ignition of hydrocarbon containing mixtures by nanosecond pulsed discharges [R]. AIAA-2005-3705, 2005.
- [64] Klimov A, Bitiurin V, Moralev I, et al. Non-premixed plasma assisted combustion of hydrocarbon fuel in high-speed airflow[R]. AIAA-2006-0617, 2006.
- [65] Ombrello T, Won S H, Ju Y G, et al. Lifted flame speed enhancement by plasma excitation of oxygen[R]. AIAA-2009-0146, 2009.
- [66] Yoshinori M, Megumu O, Takamasa Y, et al. Operation characteristics of dielectric barrier discharge for ignition enhancement in supersonic flow [J]. Nihon Koku Uchu Gakkai Ronbunshu, 2012, 60(2): 96-99.
- [67] Matsubara Y, Takita K, Masuya G. Combustion enhancement in a supersonic flow by simultaneous operation of DBD and plasma jet[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2013, 34: 3287-3294.
- [68] Leonov S B, Yarrantsev D A. Plasma-induced ignition and plasma-assisted combustion in high speed flow[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2007, 16(1): 132-138.
- [69] Michael B S, Robert F A, Biswa G N, et al. Pulsed DC discharge dynamics and radical driven chemistry of ignition [R]. AIAA-2005-0602, 2005.
- [70] Mintusov E, Serdyuchenko A, Choi I, et al. Mechanism of plasma assisted oxidation and ignition of ethylene-air flows by a repetitively pulsed nanosecond discharge[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2): 3181-3188.
- [71] Klimov A, Bitiurin V, Kuznetsov A, et al. External and internal plasma assisted combustion[R]. AIAA-2003-0698, 2003.
- [72] Klimov A, Bitiurin V, Brovkin V, et al. Optimization of plasma generators for plasma assisted combustion [R]. AIAA-2001-2874, 2001.
- [73] 梁华. 翼型等离子体流动控制研究[D]. 西安: 空军工程大学, 2009.
- LIANG Hua. Research on flow control of airfoil plasma [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [74] 梁华, 李应红, 吴云, 等. 等离子体气动激励的数值仿真 [J]. 高电压技术, 2009, 35(5): 1071-1076.
- LIANG Hua, LI Yinghong, WU Yun, et al. Numerical simulation of plasma aerodynamic actuation[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(5): 1071-1076. (in Chinese)
- [75] 梁华, 李应红, 程邦勤, 等. 等离子体气动激励抑制翼型失速分离的仿真研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(5): 777-783.
- LIANG Hua, LI Yinghong, CHEN Bangqin, et al. Numerical simulation of airfoil stall separation suppression by plasma aerodynamic actuation [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(5): 777-783. (in Chinese)
- [76] Klimov A, Bitiurin V, Brovkin V, et al. Optimization of plasma assisted combustion[R]. AIAA-2002-2250, 2002.
- [77] Aleksandrov A F, Bychkov V L, Chernikov V A, et al. Plasma aerodynamics investigations in MSU physical department[R]. AIAA-2005-1443, 2005.
- [78] Yarrantsev D A, Leonov S B, Bitiurin V A, et al. Spectroscopic diagnostics of plasma-assisted combustion in high-speed flow[R]. AIAA-2015-3396, 2015.
- [79] 姜春阳, 夏胜国, 邹鑫, 等. 介质阻挡放电边缘电场对甲烷燃烧强化的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 26-30.
- JIANG Chunyang, XIA Shengguo, ZOU Xin, et al. Effects of edge electric field in dielectric barrier discharges on methane combustion enhancement[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 26-30. (in Chinese)
- [80] 兰宇丹, 何立明, 王峰, 等. 等离子体气动效应对燃烧室流场的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 217-222.
- LAN Yudan, HE Liming, WANG Feng, et al. Influence of plasma aerodynamic effect on chamber flow field[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 217-222. (in Chinese)
- [81] Moon S B, Mark A C. Simulations of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharges[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(11): 113301. 1-113301. 6.
- [82] Sharath N, Vigor Y. Chemical and transport effects of nanosecond plasma discharges on H₂-air and C₂H₄-air mixtures[R]. AIAA-2012-0328, 2012.
- [83] Aleksandrov N L, Kindysheva S V, Starikovskiy A. Simulation of active species production in non-equilibrium discharge plasmas[R]. AIAA-2011-3447, 2011.
- [84] Langer T, Markus D, Maas U. Influence of non-equilibrium plasma on the ignition process due to repetitive streamer discharges[R]. AIAA-2011-3450, 2011.
- [85] Starikovskii A, Skoblin M, Hammer T. Influence of weak electric fields on flame structure [R]. AIAA-2008-995, 2008.
- [86] Takana H, Tanaka Y, Nishiyama H. Computational simulation of reactive species production by methane-air DBD at high pressure and high temperature[J]. Journal of Exploring the Frontiers of Physics, 2012, 97(1): 25001. 1-25001. 4.
- [87] Breden D, Raja L L. Modeling of an atmospheric pressure plasma jet with flow effects[R]. AIAA-2013-0920, 2013.
- [88] 郑洪涛, 孙海鸥, 谭智勇, 等. 等离子发生器中空气流场的数值分析[J]. 热科学与技术, 2002, 1(1): 76-80.
- ZHENG Hongtao, SUN Haiou, TAN Zhiyong, et al. Numerical analysis of airflow field in plasma generator[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2002, 1(1):

- 76-80. (in Chinese)
- [89] 穆勇,郑洪涛,谭智勇,等. 等离子体点火器三维燃烧流场的有限速率化学反应数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2004, 46(6): 431-436.
- MU Yong, ZHENG Hongtao, TAN Zhiyong, et al. Simulation of three-dimensional combustion by finite-rate chemical reaction in plasmagenerator[J]. Turbine Technology, 2004, 46(6): 431-436. (in Chinese)
- [90] 孔凡杰. 等离子体点火器出口点火能量数值模拟分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
- KONG Fanjie. Numerical simulation of ignition energy in the outlet of plasma igniter[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)
- [91] 杨家龙, 于婷婷, 陈明敏. 燃气轮机连续弧等离子体点火器仿真与实现[J]. 燃气轮机技术, 2010, 23(2): 34-38.
- YANG Jialong, YU Tingting, CHEN Mingmin. Simulation and implementation of gas turbine continuous arc plasma generator[J]. Gas Turbine Technology, 2010, 23(2): 34-38. (in Chinese)
- [92] ZHU Yifei, WU Yun, CUI Wei, et al. Modeling of plasma aerodynamic actuation driven by nanosecond SDBD discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(35): 501-509.
- [93] ZHU Yifei, WU Yun, CUI Wei, et al. Numerical investigation of energy transfer for fast gas heating in atmospheric nanosecond pulsed dbd under different negative slopes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(49): 1-13.
- [94] 朱益飞, 吴云, 崔巍, 等. 大气压空气纳秒脉冲等离子体气动激励特性数值模拟与实验验证[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2081-2091.
- ZHU Yifei, WU Yun, CUI Wei, et al. Numerical simulation and experimental validation of pulsed nanosecond plasma aerodynamic actuation in air under atmospheric pressure[J]. Acta Aeronautica and Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2081-2091. (in Chinese)
- [95] YU Jinlu, HE Liming, DING Wei, et al. Impacts of air pressure on the evolution of nanosecond pulse discharge products[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(5): 363-368.
- [96] 杜宏亮, 何立明, 兰宇丹, 等. 约化场强对氮-氧混合气放电等离子体演化特性的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(11): 457-462.
- DU Hongliang, HE Liming, LAN Yudan, et al. Influence of reduced electric field on evolution of nitrogen-oxygen mixtures plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(11): 457-462. (in Chinese)
- [97] 杜宏亮, 何立明, 丁伟, 等. 空气放电等离子体中活性粒子数浓度演化规律[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 2041-2046.
- DU Hongliang, HE Liming, DING Wei, et al. Evolution law analysis of active particles density in air discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(8): 2041-2046. (in Chinese)
- [98] 杜宏亮, 何立明, 丁伟, 等. 空气放电非平衡等离子体的模拟计算[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(4): 1077-1081.
- DU Hongliang, HE Liming, DING Wei, et al. Calculation of non-equilibrium plasma under air discharges[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(4): 1077-1081. (in Chinese)
- [99] 杜宏亮, 何立明, 兰宇丹, 等. 非平衡等离子体对 CH_4 /空气混合气燃烧的影响[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(3): 11-14.
- DU Hongliang, HE Liming, LAN Yudan, et al. Influence of non-equilibrium plasma on combustion characteristics of methane/air[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2011, 12(3): 11-14. (in Chinese)
- [100] 兰宇丹, 何立明, 丁伟, 等. 不同初始温度下 H_2/O_2 混合物等离子体的演化[J]. 物理学报, 2010, 59(4): 2617-2621.
- LAN Yudan, HE Liming, DING Wei, et al. Evolution of H_2/O_2 mixtures plasma under different initial temperature[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(4): 2617-2621. (in Chinese)
- [101] Ju Y G, Ombrello T, Won S. Diagnostics for combustion and ignition enhancement using the non-equilibrium plasma[R]. Princeton, New Jersey: Princeton University, 2008.

(编辑: 叶 青)