

俄罗斯等离子体点火和辅助燃烧研究进展

李钢¹, 李华², 杨凌元¹, 徐燕骥¹, 聂超群¹, 朱俊强¹

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190
2. 中国国防科技信息中心, 北京 100142

摘要 点火和稳定燃烧是燃烧学研究中重要的问题之一。等离子体不仅能加热气流,而且非平衡等离子体还会产生大量化学活性物质如处于激发态的分子和自由基,可以实现大范围点火、减小点火延迟、改善火焰稳定性、拓宽可燃极限等。近年来,等离子体点火和助燃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。俄罗斯在等离子体点火和辅助燃烧方面研究一直保持国际领先水平,开展了大量开创性工作,引领了等离子体点火和助燃的发展方向。对中国科研工作者来说学习借鉴俄罗斯在该领域的研究无疑大有裨益。文中介绍了俄罗斯在等离子体点火和助燃方面的研究进展,以及相关的研究机构和出版的刊物,以便于中国的科研工作者与俄罗斯同行开展国际合作与学术交流。

关键词 俄罗斯; 等离子体; 点火; 辅助燃烧; 超声速燃烧

中图分类号 O53, TM8, TK5

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.17.011

Review of the Plasma Ignition and Assisted Combustion in Russia

LI Gang¹, LI Hua², YANG Lingyuan¹, XU Yanji¹, NIE Chaoqun¹, ZHU Junqiang¹

1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
2. China Defense Science & Technology Information Center, Beijing 100142, China

Abstract The ignition and the stable combustion provide two critical points in the combustion studies and applications. With the plasma actuation, not only the gas flow is heated, but also a large quantities of chemical substances are produced by the non-equilibrium plasma, such as the excited molecules and free radicals, which could be used to realize a wide range of ignition, to reduce the ignition delay, to improve the stability of the flame and to expand flammable limits together with other advantages. A great amount of experiments and numerical simulations were carried out in Russia. This paper reviews the data available and discusses their treatments. Some conclusions on the main achievements and prospects of the future investigations in this field are made. The results definitely confirm that the field of the plasma ignition and the plasma-assisted combustion is highly promising for a number of industrial applications.

Keywords Russia; plasma; ignition; plasma-assisted combustion; supersonic combustion

0 引言

点火和稳定燃烧是燃烧学研究中的重要问题之一。减少点火延迟、改善火焰稳定性、防止火焰吹熄、高空点火、减小氮氧化物和碳氢化合物排放、拓宽燃料可燃性极限都是与点火及稳定燃烧相关领域中的关键技术。

对于航空喷气发动机而言,有效的调控点火和燃烧对提升航速等都大有裨益。在高空和燃烧室低压条件下火焰吹熄时的迅速再次点火是航空喷气发动机极其重要的性能之一。如何保证贫燃条件下的火焰稳定(贫燃有助于减少发动机氮氧化物排放)也是一项重要技术。

收稿日期: 2011-12-01; 修回日期: 2012-04-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(51076150)

作者简介: 李钢, 副研究员, 研究方向为等离子体流动控制和辅助燃烧, 电子信箱: ligang@iet.cn

超声速点火和燃烧是超燃冲压发动机研究中的一项关键技术,世界上多个国家对其高度重视,投入了大量人力物力开展研究。对于超声速燃烧,流体驻留时间短成为困扰学者的一大难题,如 101kPa(1 大气压)下温度为 1000—1500K 时,乙烯/空气的点火延迟为 30ms—20 μ s,而马赫数为 2—3 的流体在长 1m 的燃烧室驻留时间仅为 1ms,流体留驻在燃烧室的时间与化学反应时间处于同一量级,很难达到充分燃烧。解决这一难题有凹腔稳燃、能量注入、自燃物添加等几个方法。不过采取凹腔稳燃的方法会增大压力损失,还可能出现与超声速气流不匹配造成不充分燃烧的情况。而采取能量注入的方法则需要附加的燃烧室。

采用等离子体点火和助燃会有诸多好处^[1-6],等离子体不仅能快速加热气流,而且非平衡等离子体还会产生大量化学活性物质,如处于激发态的分子和自由基,可以实现大范围点火、减小点火延迟、改善火焰稳定性、拓宽可燃极限等。此外,等离子体激励没有运动部件,具有结构简单紧凑、激励参数容易调节、响应迅速等优点。近年来,等离子体点火和助燃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。等离子体激励在点火、助燃、提高燃烧稳定性和效率等方面,都有显著效果。

多年来,俄罗斯在等离子体点火和辅助燃烧方面的研究一直保持国际领先水平,国际顶级刊物大量报道了俄罗斯学者的研究成果,他们的研究成果也被同行频繁引用。来自莫斯科物理技术学院(Physics of Nonequilibrium Systems Lab, Moscow Institute of Physics and Technol, MIPT)的 Roupassov, Starikovskaya^[1-2], Starikovskii^[2-3], 来自俄罗斯中央空气动力研究院的 Efimov, 来自俄罗斯科学院高温研究所(Joint Institute of High Temperature, RAS)的 Leonov^[7]是其中的佼佼者,他们开展了大量开创性工作,引领了等离子体点火和助燃的发展方向。

俄罗斯科学院高温研究所是俄罗斯在能源和热物理领域的顶级研究机构,该机构在 1960 年创建之初就开始了低温等离子体的研究,《High Temperature》(《高温》)是俄罗斯科学院高温研究所主办的刊物。在 1963 年发行的双月期刊《高温》中开辟有等离子体研究的专栏,最近几年,每期中都会报道等离子体点火和助燃方面的研究。

跟踪学习俄罗斯的研究成果,并为之开展国际合作与学术交流,无疑是加快中国在该领域发展的有效方式。

1 等离子体点火研究

传统的点火方式包括表面加热、值班(pilot flame)火焰、电火花、电弧、高能激光等。这几种传统点火方式都存在点燃区域小的问题,特别是对于高速流动,这个问题尤为突出。

近年来,各国学者对利用纳秒脉冲产生非平衡等离子体点火开展了大量研究。来自俄罗斯 MIPT 的研究团队首先开展了单脉冲快速电离波(FIW)点火的研究^[1-4]。

Starikovskaya 等^[1]指出利用放电产生的平衡或近平衡等离子体(电火花、电弧)来缩短点火时间的机理是热效应以及与之相关的热裂解。而非平衡等离子体缩短点火时间的机理主要是电子碰撞使分子发生裂解和激发。实验结果表明,高压纳秒脉冲放电可以显著缩短点火延迟,同时着火温度显著降低。

Bozhenkov 等^[2]开发了用于研究高压纳秒放电点火的数值模型,该模型适用于氢气/空气、甲烷/空气的混合物,通过实验和数值模拟的方法,验证了利用非平衡气体放电在宽广的压力、温度和当量比下可以有效控制点火。

Aleksandrov 等^[4]开展了碳氢燃料高压纳秒放电点火的实验和数值模拟研究。等离子体点火的数值模拟表明,在较高的气体温度时,等离子体的作用可以归纳为产生原子和自由基,以及由此引发的链式反应,计算表明放电产生的气体加热作用不足以解释实验测量到的点火延迟的改变,放电使分子裂解才是根本原因。气体温度较低时,放电的作用与由于放电产生活性粒子的复合造成的气体加热相关,这种方式的气体加热较外部热源加热的方式更快,因此链式反应能更早发生,进而缩短了点火时间。

Kosarev 等^[5]对甲烷/空气/氩气混合物高压纳秒放电点火动力学开展了实验和数值模拟研究。放电能量 10—30mJ/cm³ 时,可以减小点火延迟达一个数量级。点火延迟的计算结果和实验结果吻合得很好。对模拟结果的分析表明,放电时电子碰撞使分子裂解,由此产生的氧原子和氢原子引起一系列链式反应加速,这是非平衡等离子体缩短点火延迟时间的主要原因。

Kosarev 等^[6]还通过数值和实验方法研究了 C_nH_{2n+2}:O₂:Ar (n 为 2—5)混合物的点火动力学。他们发现在一定实验条件下放电参数与气体密度密切相关,而与气体温度关系不大。他们用数值方法研究了自由基在等离子体点火中的作用,发现氧原子对点火延迟的影响最显著。计算还表明自燃点火延迟与等离子体点火延迟的差别只能由放电产生的自由基来解释,加热的作用非常小。

Napartovich 等^[7]开展了高速流动中利用非平衡放电点燃空气和氢气混合物的动力学计算,开发了可用于计算放电特性的模型。计算表明,少许的能量消耗就可以显著缩短点火延迟,如果同样能量用于加热气体则达不到这样效果。

Ershov 等^[8]实验测量了超声速气流中的放电参数,他们还通过等离子体射流实现了超声速丙烷和空气点火^[9-10],并研究了初始条件对点火空间位置和强度的影响。

Shibkov 等^[11]开展了超声速丙烷-空气的点火研究,利用表面微波放电实现不同当量比下的点火,图 1 给出了不同当量比下火焰面的传播速度,微波脉冲宽度 120 μ s、微波功率为 70kW。作者指出在实验条件下(40Torr)放电形成之初的传播速度可以达到 100km/s,是空气中声速的几个数量级,因此在超声速气流中也很容易产生放电,实验结果也表明超声速气

流对放电和功耗几乎没有影响。图 2 给出了在马赫数为 2 的气流中放电图片,实验条件为:脉冲宽度 $120\mu\text{s}$ 、功率 50kW 、压力 40Torr 、空气流量 55.5g/s ,在相同条件下实现点火的图片见图 3。

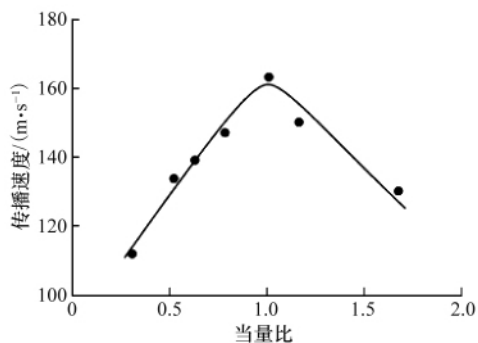


图 1 不同当量比下火焰前锋传播速度

Fig. 1 Dependence of the combustion front propagation velocity on the equivalent ratio

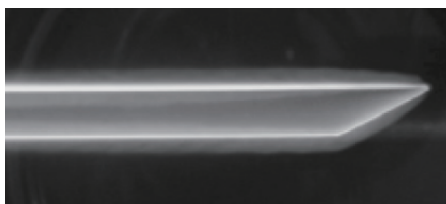


图 2 在超声速气流中放电图片

Fig. 2 Discharge in supersonic flow



图 3 微波放电等离子体实现丙烷和空气混合物点火

Fig. 3 Ignition of the supersonic propane-air flow

Barkhudaro 等^[12]研究了一种可用于点火和加热气体的环形放电器,图 4 是该放电器输入高压脉冲时放电的图片。作者估算,对于直径为 50mm 的环形放电器,在输入能量为 200J 时,圆环中心附近温度可以高达 6000K 。环形放电器放电时可以产生环形激波,图 5 给出了环形激波逐渐向环心演进的过程,图 5 中图片的时间间隔为 $45\mu\text{s}$ 。作者指出,可以将该放电器布置在凹腔燃烧室内。

非平衡等离子体在超声速气流中某个区域引发并维持的等离子体-化学反应能否拓展到没有放电的区域? Efimov 等^[13]通过构思(图 6)的实验布局对这个问题给出了肯定的回答。燃料气丙烷通过管 1 和 3 提供,燃料管 1 同时还是阳极,燃料管 3 覆盖一层绝缘材料以避免放电,平板 2 为阴极,通过调整燃料管 1 和 3 的位置以及丙烷流量,利用衍射光谱仪测量不同组分的发光强度。



图 4 一种轴对称环形放电器放电图片

Fig. 4 Discharge of the ring discharger

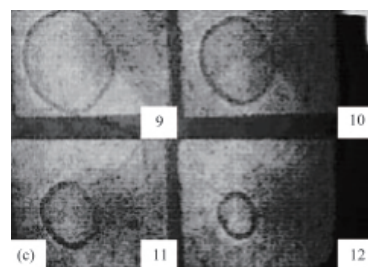
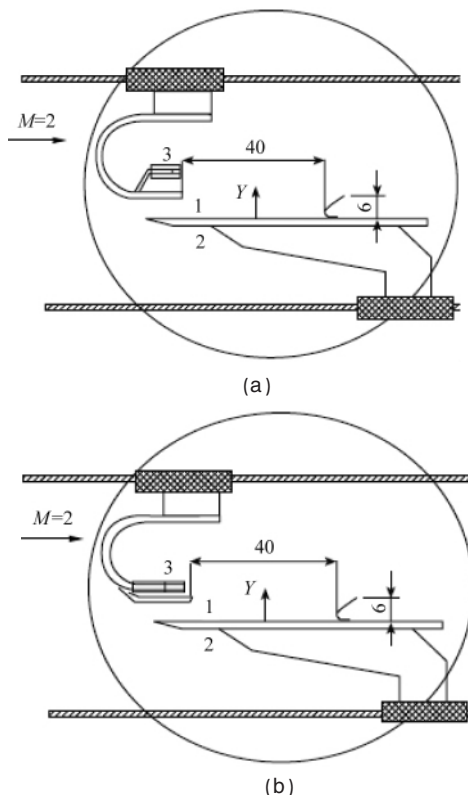


图 5 放电时产生的激波演进过程

Fig. 5 Development of the shock under the discharge



1—阳极,2—阴极,3—表面有绝缘层的供气管

图 6 实验布局

Fig. 6 Schematic diagram of the model

Leonov 等^[14-16]利用准直流周期脉冲放电在马赫数为 2 的风洞上开展了等离子体点火研究,当放电功率大于 1kW 时实

现了点火,图7给出了准直流周期脉冲放电示意图。

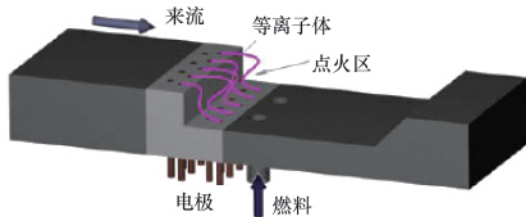


图7 准直流周期脉冲放电示意
Fig. 7 Scheme of direct current periodic pulse discharge

Leonov 等^[7]还提出了等离子体点火的双区域模型,他们通过次模型解释了实验数据,并通过数值模拟进一步验证了该模型有效。

2 等离子体辅助燃烧研究

Leonov 等^[14]总结了不同方式产生的等离子体助燃的优缺点,如表1^[10]所示,并在来流马赫数为2的风洞上,实验研究了利用准直流周期脉冲放电产生的等离子体助燃效果^[14-18]。图8为等离子体电极的布局方式,图9为在空气里的放电图片和乙烯/空气放电和燃烧图片。起始静压为 $(0.2-0.8) \times$

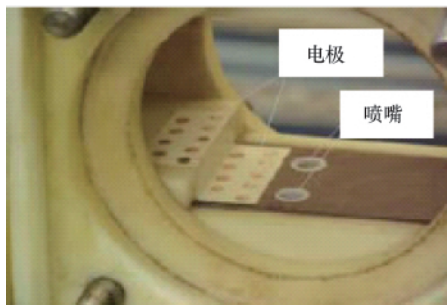


图8 等离子体电极的布局
Fig. 8 Arrangement of electrodes

10^5Pa ,燃料喷嘴布置在凹槽底部,等离子体发生器的输入功率为1—10kW。当放电功率超过3kW同时当量比大于1时,火焰蔓延到凹槽的上部,如图9所示。

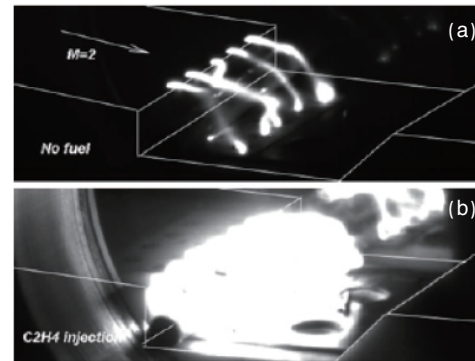


图9 在空气里的放电图片(a)
和乙烯/空气放电和燃烧图片(b)
Fig. 9 Picture of discharge in air (a), picture of discharge in ethylene/air and combustion (b)

Leonov 等^[20-21]还研究了利用等离子体诱导的局部不稳定流动分离来改善超音速燃烧器的性能,实验布局如图10所

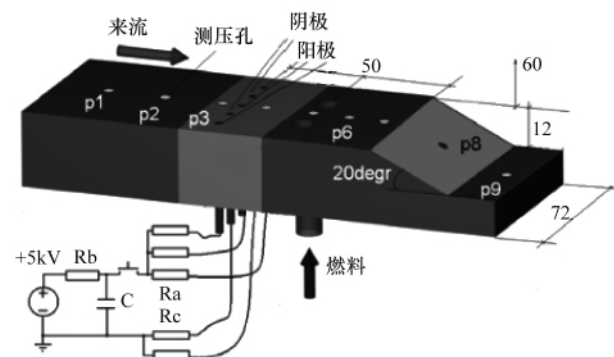


图10 燃烧室底部布局示意 (mm)
Fig. 10 Experimental arrangement of the combustor bottom wall (mm)

表1 不同方式产生的等离子体助燃的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of different kinds of plasma combustion enhancement

放电类型	功率	优点	缺点
纵向电弧	1—100kW 连续	高温	生成在附面层,电极侵蚀,低效
横向直流电弧	1—100kW	掺混,高温	电极侵蚀,低效,作用区域小
分离区里电弧	1—100kW	掺混,高温,自调整	生成在分离区
高频丝状	1—10kW	高速穿透,掺混,单电极	低功率,生成位置不确定
高频兆瓦炬	1—10kW	单电极或无电极	对流动非常敏感
兆瓦丝状	0.1—10J/脉冲	无电极,高效生成自由基	复杂,高压时击穿阈值高
激光火花	宽广	高密度能量沉淀	作用区域小,激光效率低
高压辉光	1—100kW	大区域,高效生成自由基	高功耗,需要多电极系统
纳秒脉冲	0.01—10J/脉冲	高效生成自由基,高速穿透	均匀放电需低气压
短脉冲横向火花	1—100J/脉冲	高密度能量沉淀,高效掺混	需要多电极系统
介质阻挡/电晕	1W/cm ²	高效生成自由基	近表面生成,低密度能量沉淀

示,图中 p1-p9 为壁面测压孔, Ra、Rb、Rc 为电阻, C 为电容, degr 代表角度。等离子体诱导的分离区可以起到类似凹槽或凸起物的作用,在燃烧器非设计工况下可以改善燃烧器无法自燃或运行不稳定的问题。实验中未采用其他稳燃方法,燃料分别为氢气和甲烷。实验采用展向放电的方式,观测到放电加热了空气,产生大量自由基,同时放电还会改变流场,有可能诱导了流动分离。通过改变等离子体生成位置和放电结构,可以消耗较小的能量而获得最大的效果。等离子体消耗功率小于 3kW 即可实现氢气稳定燃烧。不论燃料是氢气还是乙烯,在优化条件下燃烧效率均可以达到 70%。

Leonov 等^[22]还提出了在等离子体调控下实现燃料的阶梯燃烧,以避免低温时发生热阻塞或燃烧不稳定现象,图 11 给出了等离子体调控的低温超音速燃烧室示意图^[21]。

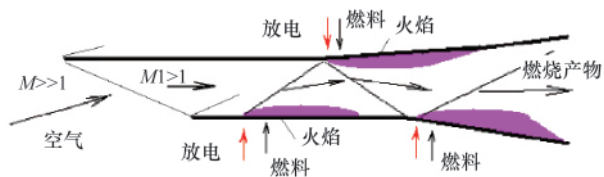


图 11 等离子体调控的低温超音速燃烧室示意
Fig. 11 Schematic diagram of electrically controlled low-temperature supersonic combustor

Efimov 等^[23-25]通过光谱测量对等离子体助燃开展了一系列研究,光谱测量不仅能获得放电对生成组分的影响还可以分析放电的空间特性。在超声速燃烧中丘形物后的分离区还不足以构成稳定燃烧的充分条件,Efimov 等^[24]研究了在此区域加入直流放电的助燃效果。实验布局如图 12 所示,煤油和空气通过平板上(图 12 中的 1)的两条槽射入丘形物(图 12 中的 2)内并通过丘形物后部射入分离区,图 12 中的 3 为电极。实验中观察到喷射煤油时,放电会扩大至分离区内。光谱测量表明,等离子体化学反应区域不只局限在平板附近,而且还会扩大到主流区,作者指出,对于工程实用来说这点尤

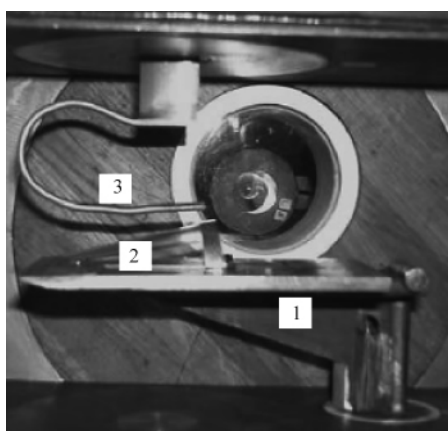


图 12 实验布局
Fig. 12 Experiment setup

为重要。

Efimov 等^[25]设计了一种独特的超燃等离子体助燃装置(图 13),为减小阻力其外形为流线型,布置在实验段中间。有无来流时其放电有很大差异,由图 14 和图 15 可见有来流时放电位置明显上移,对流场的数值模拟表明这是由于激波与膨胀波相互作用在阳极后形成的低压区所至,该低压区不仅有利放电,还强化了燃料和空气的掺混。

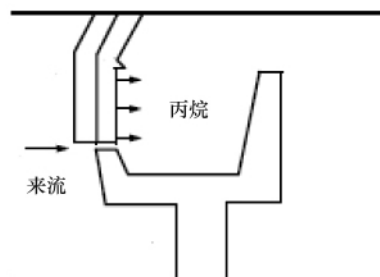


图 13 实验布局
Fig. 13 Experiment setup

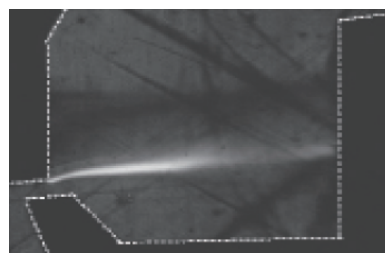


图 14 无来流时放电图片
Fig. 14 Discharge picture without coming flow

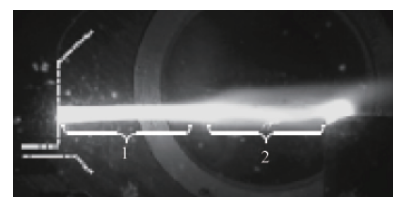


图 15 有来流时放电图片
Fig. 15 Discharge picture with coming flow

Ershov 等^[26]通过布置在丙烷气入口、电极处以及电极上下游的 20 支压力传感器测量不同时刻的压力信号,并利用光电倍增管测量电极下游 60cm 处的光信号,表明在放电作用下可以保证略贫预混的丙烷和空气的稳定燃烧;如果减小空气供气压力而保持丙烷供气压力不变,由贫燃向富燃过渡,燃烧会向不稳定状态转变,出现着火时熄火点火模式。电流大于 10A 且电流脉冲超过 10ms 是实现稳定燃烧的必要条件。

Anikin 等^[27]和 Mintoussov 等^[28]开展了利用重复纳秒脉冲放电助燃大气压下丙烷/空气预混燃烧的研究,纳秒电源输出电压 10—20kV,脉冲重复频率为 1.2kHz,脉宽 77ns,上升前

沿 10ns, 燃烧器示意图如图 16 所示。实验结果表明在宽广的当量比下等离子体增强了火焰稳定性, 提高了火焰的吹熄速度, 如图 17 所示, 当量比在 0.65—0.75 范围内等离子体对火焰吹熄速度的影响最显著, 火焰的吹熄速度提高了 2 倍多, 而实验中等离子体消耗的功率不超过燃烧器功率的 1%。沿燃烧器轴向不同高度的光谱测量发现在放电区域出现了 OH 的另一个峰值, 如图 18 所示。他们还开发了可用于定量描述介质阻挡放电对火焰传播影响的数值模型。

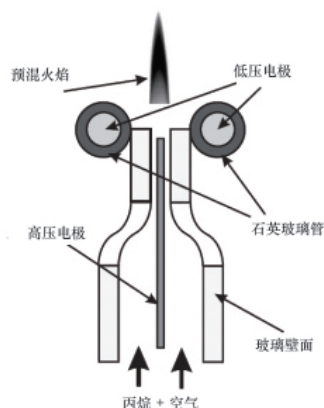


图 16 纳秒脉冲放电助燃丙烷/空气燃烧示意

Fig. 16 Burner construction of propane-air flame control by nanosecond pulsed streamer discharge

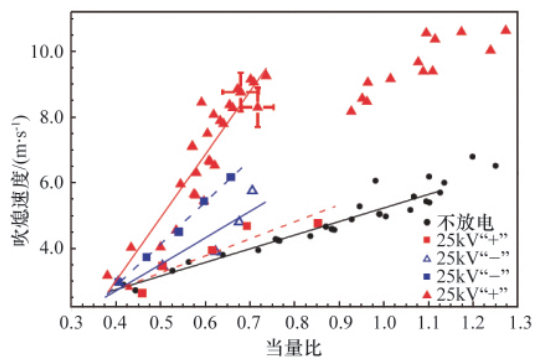


图 17 不同当量比下的火焰吹熄速度

Fig. 17 Comparative analysis of the effects of different discharge types on the flame propagation velocity

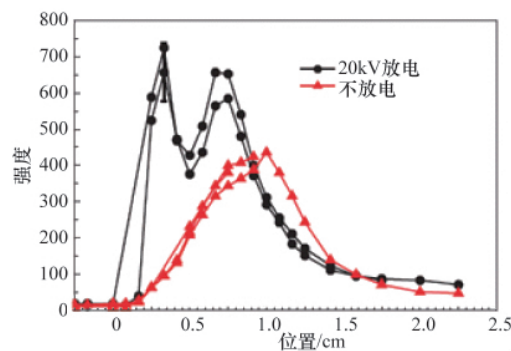


图 18 OH 发射光谱强度分布

Fig. 18 OH emission profile along flame height with and without barrier discharge ($\phi=1.3, \lambda=306.4$)

Anikin 等^[29-30]还开展了利用脉冲等离子体实现碳氢燃料非燃氧化的研究。实验时的放电频率为 40Hz, 压力为 1—20Torr, 碳氢化合物与空气的混合物没有流动。图 19 给出了碳氢化合物的氧化时间, 可见在他们的实验条件下燃料的氧化时间为几十到几百秒, 也就是说实现碳氢化合物的基本全部氧化需要 1000—10000 个脉冲。

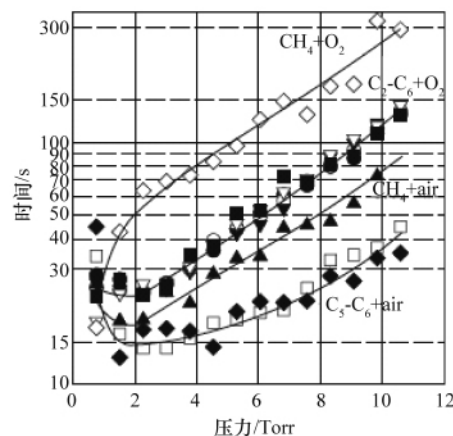


图 19 碳氢化合物氧化时间

Fig. 19 Dependencies of alkanes full oxidation time on initial pressure of stoichiometric mixtures, obtained from CO band emission

Nikipelov 等^[31]开展了纳秒脉冲等离子体管点火助燃的实验和数值模拟的工作, 给出了当量比为 0.03—3.3 超贫燃烧和超富燃烧的阶段性成果, 燃料为甲烷和柴油蒸汽, 通过实验优化了等离子体管的形状参数和激励参数。

此外, Starikovskaia 等^[32]在 2006 年详细论述了等离子体点火和辅助燃烧的研究进展。

3 结论

俄罗斯等离子体点火和辅助燃烧的研究主要集中在超声速点火和稳燃的实验研究方面。可以看出俄罗斯研究者实验构思巧妙; 实验装置设计有创新, 有较强的实用性, 如 Barkhudarov 设计的环形放电器, Leonov 设计的点火装置和燃料的阶梯燃烧方法, Efimov 设计的独特的助燃装置, 这些都值得学习借鉴。

参考文献 (References)

- [1] Starikovskaya S M, Kukaev E N, Kuskis A Y, et al. Analysis of the spatial uniformity of the combustion of a gaseous mixture initiated by a nanosecond discharge[J]. *Combustion and Flame*, 2004, 139(3): 177-187.
- [2] Bozhenkov S A, Starikovskaya S M, Starikovskii A Y. Nanosecond gas discharge ignition of H₂- and CH₄-containing mixtures [J]. *Combustion and Flame*, 2003, 133(1): 133-146.
- [3] Starikovskii A Y. Plasma supported combustion [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, 30(2): 2405-2417.

- [4] Aleksandrov N L, Kindysheva S V, Kosarev I N. Mechanism of ignition by non-equilibrium plasma[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 32(1): 205-212.
- [5] Kosarev I N, Aleksandrov N L, Kindysheva S V, et al. Kinetics of ignition of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: CH₄ - containing mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 154(3): 569-586.
- [6] Kosarev I N, Aleksandrov N L, Kindysheva S V, et al. Kinetics of ignition of saturated hydrocarbons by nonequilibrium plasma: C₂H₆ - to C₃H₁₂-containing mixtures[J]. *Combustion and Flame*, 2009, 156(1): 221-233.
- [7] Napartovich A P, Kochetov I V, Leonov S B. Calculation of the dynamics of ignition of an air-hydrogen mixture by nonequilibrium discharge in a high-velocity flow[J]. *High Temperature*, 2005, 43 (5): 677-683.
- [8] Ershov A P, Kolesnikov E B, Logunov A A, et al. Parameters of electrode discharges in supersonic air flows [J]. *High Temperature*, 2009, 47(2): 183-192.
- [9] Ershov A P, Kamenshchikov S A, Logunov A A, et al. Initiation of combustion of supersonic propane-air flow by magnetoplasma compressor discharge[J]. *High Temperature*, 2009, 47(6): 788-795.
- [10] Ershov A P, Chernikov V A, Surcont O S, et al. Parameters of a plasma jet injected in a supersonic air and propane-air mixture flows [C]. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 10-13 January 2005, Reno, Nevada, 2005-986
- [11] Shibkov V M, Shibkova L V, Gromov V G, et al. Influence of surface microwave discharge on ignition of high-speed propane-air flows[J]. *High Temperature*, 2011, 49(2): 155-167.
- [12] Barkhudarov E M, Berezhetskaya N K, Zhuravskaya T S, 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.
- [13] Efimov B G, Inshakov S I, Skvortsov V V. Spectroscopic investigation of interaction between propane jets injected into a supersonic flow of air under conditions of development of a nonequilibrium discharge in one of the jets[J]. *High Temperature*, 2009, 47(3): 326-330.
- [14] Leonov S B, Yarantsev D A, Napartovich A P, et al. Plasma-assisted ignition and flameholding in high-speed [C]. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada, 2006-563.
- [15] Leonov S, Yarantsev D, Starodubtsev M. Mechanisms of fuel ignition by electrical discharge in high-speed flow [C]. 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 6-9 Nov 2006, National Convention Centre Canberra, AIAA 2006-7907.
- [16] Leonov S B, Savelkin K V, Firsov A A, et al. Fuel ignition and flame front stabilization in supersonic flow using electric discharge [J]. *High Temperature*, 2010, 48(6): 896-902.
- [17] Leonov S, Kochetov I V, Napartovich A P, et al. Plasma-induced ethylene ignition and flameholding in confined supersonic air flow at low temperatures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(2): 781-786.
- [18] Leonov S B, Yarantsev D A. Plasma-induced ignition and plasma-assisted combustion in high-speed flow[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2007, 16(1): 132-138
- [19] 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(6): 2514-2525
- [20] Leonov S, Carter C, Starodubtsev M, et al. Mechanisms of fuel ignition by electrical discharge in high-speed flow [C]. 14th AIAA/AHI Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Canberra, Australia, 6-9 Nov, 2006 AIAA paper 2006-7907.
- [21] Leonov S, Yarantsev D. Experiments on electrically controlled flameholding on a plane wall in supersonic airflow [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 289-294.
- [22] Leonov S B, Yarantsev D A, Carter C. Transversal electrical discharge as a new type of flameholder[C]. 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, 28 April-1 May 2008, Dayton, Ohio. AIAA 2008-2675
- [23] Ivanov V V, Skvortsov V V, Efimov B G, et al. Spectroscopic investigations of longitudinal discharge in supersonic flow of air with injection of propane into the discharge zone [J]. *High Temperature*, 2008, 46(1): 7-14.
- [24] Efimov B G, Inshakov S I, Klimov A M, et al. An investigation of the structure of the zone of plasma chemical reactions behind a screen in supersonic flow with injection of kerosene into the space under the screen in the presence of nonequilibrium discharge [J]. *High Temperature*, 2010, 48(2): 151-156.
- [25] Efimov B G, Ivanov V V, Inshakov S I, et al. Investigation of formation of a spatial position of longitudinal discharge in a supersonic flow by fitting the configuration of an anode under conditions of injection of propane and kerosene into the discharge zone [J]. *High Temperature*, 2010, 49(4): 479-486.
- [26] Ershov A P, Kamenshchikov S A, Logunov A A, et al. The combustion of high-velocity air-propane flow initiated by a longitudinal-and-transverse DC discharge[J]. *High Temperature*, 2009, 47(5): 643-649.
- [27] Anikin N B, Mintoussov E I, Pancheshnyi S V, et al. Nonequilibrium plasmas and its combustion and hypersonic flow control[C]. AIAA Paper 2003- Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, US, 2003.
- [28] Mintoussov E I, Pancheshnyi S V, Starikovskii A Y. Flame control by non-equilibrium low-temperature pulsed nanosecond discharge [C]. AIAA Paper 2004-1013, 42nd AIAA Aerospace Sciences and Exhibit, Reno, NV, US, 2004.
- [29] Anikin N B, Starikovskaia S M, Starikovskii A Y. Oxidation of saturated hydrocarbons under the effect of nanosecond discharge [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(7) :3244-3253.
- [30] Anikin N B, Starikovskaia S M, Starikovskii A Y. "Oxidation hydrocarbons in stoichiometric and lean mixtures with air and the action of nanosecond discharge[C]. AIAA paper 2005-0601, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, NV, US, 2005.
- [31] Nikipelov A A, Popov I B, Correale G, et al. Ultra-lean and ultra-rich flames stabilization by high-voltage nanosecond pulsed discharge [C]. 48th AIAA Aerospace sciences meeting including the new horizons forum and aerospace exposition. Orlando, FL, US, AIAA 2010-1341.
- [32] Starikovskaia S M. Plasma assisted ignition and combustion [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(16): 265-299.

(责任编辑 岳臣)