



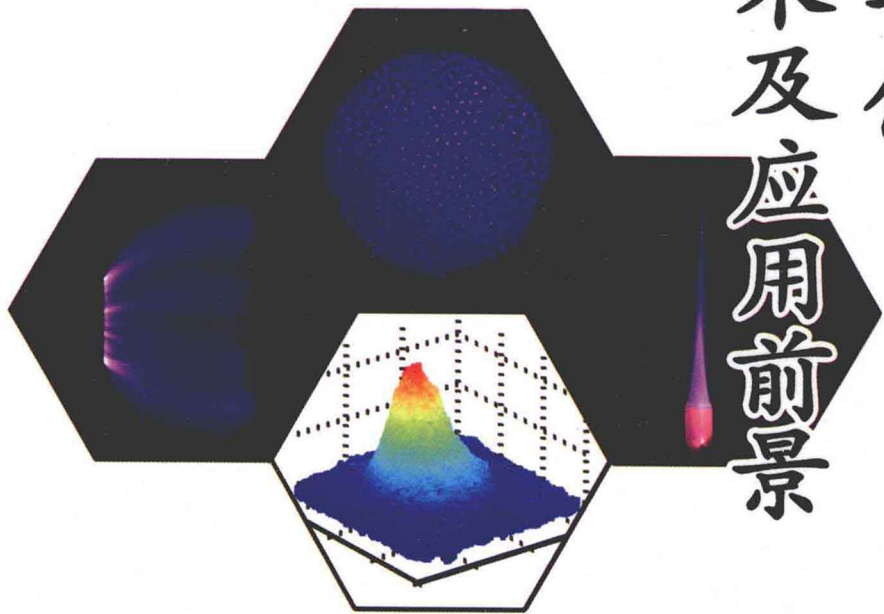
中国科协学会学术部 编

新

观点新学说学术沙龙文集

66

大气压放电等离子体 核心技术及应用前景



新观点新学说学术沙龙文集⑥⑥

大气压放电等离子体核心 关键技术及应用前景

中国科协学会学术部 编

中国科学技术出版社

· 北 京 ·

图书在版编目(CIP)数据

大气压放电等离子体核心关键技术及应用前景/中国科协
学会学术部编. —北京:中国科学技术出版社,2013. 10
(新观点新学说学术沙龙文集;66)
ISBN 978-7-5046-6445-7

I. ①大… II. ①中… III. ①大气压-放电-等离子体-研究
IV. ①O53

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第246866号

选题策划 赵 晖
责任编辑 赵 晖 夏凤金
责任校对 赵丽英
责任印制 张建农



出 版 中国科学技术出版社
发 行 科学普及出版社发行部
地 址 北京市海淀区中关村南大街16号
邮 编 100081
发行电话 010-62173865
传 真 010-62179148
投稿电话 010-62103182
网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 787mm×1092mm 1/16
字 数 250千字
印 张 13.25
印 数 1-2000册
版 次 2013年10月第1版
印 次 2013年10月第1次印刷
印 刷 北京长宁印刷有限公司

书 号 ISBN 978-7-5046-6445-7/O·169
定 价 18.00元

(凡购买本社图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换)

序 言

大气压放电技术是一项集电气工程、物理学、化学以及环境科学等不同学科领域于一体的综合交叉技术,在医学应用、废弃物处理、材料改性、绿色能源、化工和光源等领域显示出极高的科研价值和广阔的应用前景,是当前国内外学术界和工业界探索的一个多学科强交叉的新研究领域。

等离子体是固体、液体和气体三态以外新的物质聚集态,主要由电子、离子、原子、分子、活性自由基及射线组成,占据整个宇宙的99%。从19世纪中叶起,人类开始利用电场和磁场来产生和控制等离子体。20世纪90年代,国外放电等离子体技术及应用研究开始迅速发展,放电等离子体机理及特性研究与应用产业衔接日益密切。近年来,随着潜在应用需求的不断拓展,大气压放电等离子体技术日益成为电气工程领域最活跃的研究热点之一。

国内研究起步相对较晚,大气压放电等离子体的科技开发与产业布局脱节,限制了这种绿色节能无污染技术的广泛应用。针对这一现状,目前多家高校和科研院所正在开展相关技术研究。中国电工技术学会关注行业发展需求,充分认识到大气压放电等离子体技术涉及到众多物理深层问题,以及与电工技术有关的工程难题,迫切需要将各领域相关专家和科研团队组织起来,交流科研成果、探讨存在问题和亟待解决的难点。为了推动我国大气压放电等离子体技术的创新、发展与现实应用,在行业专家的大力支持和帮助下,经认真调研,中国电工技术学会拟定了“大气压放电等离子体核心关键技术及应用前景”这一沙龙主题,并邀请国内知名专家学者围绕相关议题展开研讨、辩论和交流。本期学术沙龙主要就六个方面议题进行交流和研讨,即大气压放电等离子体产生的方式及其优缺点;大气压放电机理研究进展;大气压放电等离子体产生及应用中的关键和瓶颈问题;大气压放电等离子体的测量与诊断问题;大气压放电等离子体驱动源技术现状;大气压放电等离子体的应用前景。

在中国科协的指导下,中国电工技术学会作为项目承办单位,积极认真地进行项目的组织、策划和实施工作,于2012年11月5-6日,在中国科学院电工研究所成功举办了中国科协第66期新观点新学说学术沙龙,即“大气压放电等离子体核心关键技术及应用前景学术沙龙”。沙龙举办期间,专家们充分交流各自科研成果,并就当前该领域存在的热点问题,包括等离子体技术的物理机理、电气特性、测量诊断,驱动源技术以及在工业、医疗、环保(废弃物处理)、航空航天等方面的应用等展开热烈讨论。

本期沙龙充分体现了中国科协倡导的敢于质疑、勇于创新 and 宽容失败的学术沙龙精神,沙龙在宽松、自由、平等、活跃、愉快的氛围下结束,大家意犹未尽。在本期沙龙的策划,组织及举办期间,中国科学院电工研究所的领导、专家和工作人员提供了细致周到的支持和帮助,特别是极端电磁环境科学技术部研究员邵涛博士,从沙龙项目的方案设计,议题确定、专家邀请到会务服务,全程“奋战”在一线,为学术沙龙的成功举办付出了很多辛勤汗水。在此,特向各位专家致以真诚的感谢!本书是与会专家在本期学术沙龙举办过程中精彩发言的汇编,是国内该技术领域顶级科研团队科研成果的浓缩和提炼。读者通过阅读本书,能够对国内大气压放电等离子体技术研究现状有一个全面的了解,一定受益良多。

严萍

2013年5月

目 录

高超声速飞行器中的等离子体应用技术研究	洪延姬(2)
等离子体流动控制技术及其应用	车学科(11)
大气压冷等离子体射流研究进展	江 南(16)
大气压非平衡等离子体射流的研究	卢新培(25)
大气压不同气体介质阻挡均匀放电的产生与机理研究 ...	罗海云(30)
基于等离子体气动激励的高速流场的主动控制技术 研究	罗振兵(41)
等离子体流动控制技术发展的关键问题探讨	吴 云(45)
大气压空气中纳秒脉冲弥散放电的研究	邵 涛(51)
大气压下介质阻挡放电与射流等离子体的光电特性 及其生物学效应	常正实(57)
大气压射频与斑图研究	刘忠伟(62)
从非线性动力学角度再认识和理解大气压介质阻挡 放电	戴 栋(67)
多脉冲均匀的大气压氦气介质阻挡放电	刘耀阁(76)
常压亚微秒高压脉冲介质阻挡放电实验研究	李 杰(83)
大气压射频辉光放电等离子体特性的研究	李和平(89)
面向对象的大气压等离子体源	欧阳吉庭(97)
大气压纳米级窄脉冲均匀放电等离子体特性研究	王文春(104)

大面积均匀电弧等离子体产生	夏维东(110)
大气压射频放电等离子体稳定性与活性的理论与数值 模拟研究	张远涛(114)
基于大气压 DBD 规模化应用的等离子体产生与调控 技术	张芝涛(120)
高功率微波大气击穿的理论研究	周前红(126)
大气压放电等离子体驱动源及其应用	丁卫东(132)
大面积连续化等离子体改性系统	方志(137)
放电等离子体脱除气相/液相有机污染物技术研究	李杰(146)
千赫兹、兆赫兹大气压辉光放电及其应用	施芸城(153)
利用大气压低温等离子体加工聚四氟乙烯胶带的 研究	宋红兵(158)
脉冲等离子体推进技术概述	武志文(164)
中科院电工所特种电源技术发展	张东东(170)
专家简介	(190)
部分媒体报道	(202)



会议时间

2012年11月5日

会议地点

中国科学院电工研究所

主持人

严萍

严萍：

今天大家来的都是专家,对放电等离子体的重要性和意义有着共同的认识。电工所的邵涛老师、清华的王新新老师和华中科技大学的卢新培老师倡议就此主题应该好好议议,这个提议得到了中国科协及中国电工技术学会的支持,在此表示衷心感谢!



高超声速飞行器中的等离子体应用技术 研究

◎ 洪延姬

我是中国人民解放军装备学院激光推进及其应用国家重点实验室的洪延姬，今天我想从以下四个方面介绍高超声速飞行器中的等离子体技术应用研究。

在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中,明确把空间技术作为需要超前部署的八大前沿技术之一,空间技术所涉及的众多技术中,高超声速飞行器技术是其中的关键技术。高超声速飞行器的动力装置主要是利用各类新型的推动技术,比如:超燃冲压发动机、脉冲爆震发动机。进入新世纪后,为了抢占高超声速飞行器技术制高点,我们国家在民口和军口部署了许多相关的重大科技工程和重要基础项目,民口通过自然科学基金委的基础研究平台部署了空间飞行器的若干重大基础问题的研究、近空间飞行器的关键基础科学问题研究,军口也部署了重大科技工程和重大专项。

在临近空间高超声速飞行的飞行器,因为飞行速度过高,带来了巨大的气动阻力和附面层热流;超燃冲压发动机的主流道在毫秒量级完成燃料喷注、掺混和燃烧,遇到了发动机燃烧效率不高和材料热防护要求高等难题。针对高超声速飞行器技术遇到的这一系列难题,探索中的技术途径很多。今天我要谈的是主动流动控制技术,不论是减阻还是发动机高效燃烧,都是非常有应用前景的技术途径。

主动流动控制的范畴很大,我们今天要把它缩小到等离子体主动流动控制技术(图1)。

图1中阴影部分代表高超声速飞行器轮廓。当飞行器高速飞行时头部的钝头体前出现弓体激波,会产生很大的波阻,研究表明,注入等离子体可以减少波阻。在内外亚缩段,激波干扰带来的流动分离和转裂伴随极大的摩阻和热流,注入等离

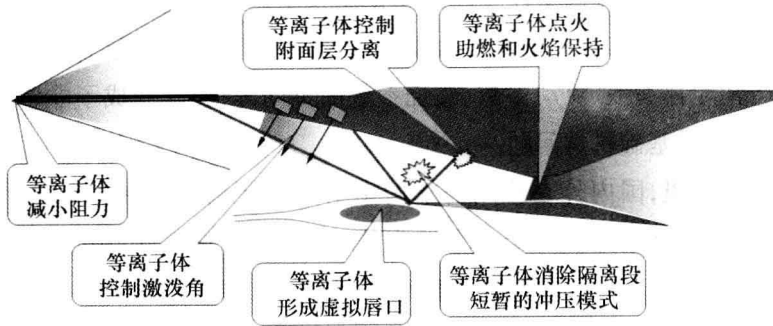


图1 等离子体主动流动控制技术示意图

子体可以改变附面层结构来减小摩阻和热流,还可以控制激波结构和激波角,在进气道唇口前形成虚拟唇口,增加来流捕获量。在燃烧室内,通过加入等离子体来改变燃气的化学活性和热活性,控制燃烧,改善火焰稳定性和燃烧效率。我们看到,对于高超声速飞行器和超然冲压发动机,等离子体主动流动控制很有用,非常需要研究。

这样一个新的需求,我们需要从国家层面,通过建造先进的科研条件,组织国家队伍开展基础研究,为什么要开展基础研究呢?因为这里面涉及的问题非常多,比如我们取出高超声速中的等离子体主动流动控制技术中的三个点。

等离子体的减阻,它所涉及的是注入等离子体要形成局部的高温高压,要产生高浓度带电粒子,要产生激波等物理力学过程;这些过程伴随着与高速流动的耦合,甚至要和超声速燃烧耦合,这就出现了多物理耦合问题。多物理耦合是一个重要且复杂的科学命题,怎么样把这个耦合处理好?以等离子体的燃烧场点火助燃来讲,点火主要强调的是热效应,也就是局部高温,同时伴随着局部的燃烧,即化学效应;而对于助燃来说,主要是化学效应,但是它也伴随热效应,这样一种等离子体物理、流体物理和燃烧物理的强耦合怎么处理?以燃烧场的等离子体增强掺混来讲,这个机制更复杂一些,等离子体、流动湍流掺混和燃烧增强耦合到一起,还有局部的高浓度带电粒子所产生的电磁力,如何更有效地控制附面层的结构,使它能够增强掺混等,也是我们要处理和研究的课题。如何描述和优化?



前面,我仅仅谈了等离子体主动流动控制技术这个大题目下三个具体应用涉及的问题,从中看见,这里面主要是流动和燃烧,有了多物理强耦合问题。这种强耦合由于等离子体参数、流动参数、燃烧参数的不同等,使其变成了非常复杂的物理力学问题,也是基础科学问题。

在这个领域里,国内外在应用需求的牵引下做了哪几个方面的工作呢?我们首先看逆向喷流减阻。对于一个钝头体,它前面形成一个很大的弓体激波,在超速飞行的时候,为了减少钝头体带来的压力(前面的波阻),我们从钝头体里面面向外喷射等离子体,所以叫逆向喷流,非常有效,目前的实验结果表明,阻力可以减少 30%,这是很值得我们深入研究的方向。

第二,等离子体边界层控制减阻技术。我们知道各类飞行器都有极大的表面和气流相接触,这个接触带来很大的流动问题,引起气动力和气动热问题。通过表面等离子体发生器来产生静电侧体力来控制附面层结构以减少摩阻,实验结果表明能减少 30% 左右。还有平行电容器控制附面层的例子,美国的 B-2A 轰炸机是靠发动机羽流中的带电粒子分离技术,让飞行器壳体前后表面形成一个大的电容器,在飞行器表面形成薄层等离子体,既有隐身又有减阻的效应。

第三,点源能量注入等离子体减阻技术。激光等离子体或者微波等离子体在钝头体前面形成局部的能量注入,把弓体激波变成斜激波来减阻,提炼无量纲因子,并通过进一步优化无量纲因子,减小波阻可以到 70%,基本抑制了波阻,而在超过 5 马赫以后,这种波阻占整个飞行器摩擦阻力的 1/3 甚至更强,所以激光等离子体减小波阻是非常值得做的方向。

第四,等离子体产生激波增强掺混技术。在掺混方面,据我们了解,我国基本没有开展研究。但是国外做了较多的研究,主要是俄罗斯、日本和美国等国家在持续地开展研究。2002 年,俄罗斯利用脉冲激光束影响剪切层的发展,实现流动增强掺混;2003 年,日本通过等离子体火炬喷注来改变燃料的掺混;2008 年,美国也是利用等离子体火炬在超燃冲压发动机里注入等离子体,实际上是为了点火注入的,但是研究表明燃料的穿透性增强了,也就是增强了燃料掺混。这里涉及什么具体需求呢?在发动机里面,特别是超燃冲压发动机里面,来流空气的刚性非常强,



燃料在燃烧室里面能够很好地快速掺混是很困难的,燃料不掺混就没法着火,发动机就不能工作。所以,在发动机里,燃料的掺混是非常重要的。

第五,等离子体点火助燃技术。在点火助燃方面,也是进入新世纪以后,主要是俄罗斯和美国做得比较多,我们国家近几年才开始做。俄罗斯在氢气和空气燃烧,以及甲烷与空气燃烧的过程中,利用纳秒气体放电形成等离子体,也就是我们常说的瞬态等离子体干预燃烧场,能够实现点火并使火焰能够稳定保持,燃烧效率能够提高。从这个实验结果中可以看到两个重要的指标,第一个指标是点火延迟时间减少了83%,相当于降低一个量级;同时它也增强了火焰传播的速度。等离子体点火助燃可以在燃烧室前面的隔离段的预混气体中大体积注入等离子体,也可在燃烧室小范围注入等离子体;注入等离子体的方式可以是大气压高压放电,等离子体火炬和介质阻挡放电等;近几年更多用的是瞬态等离子体,即冷等离子体开展点火助燃技术研究。为什么反复强调瞬态呢?就是想让等离子体能量在自由基,即活性因子上注入的多一点,而不是增加它的平动能量、振动和转动能量。第二是靠火炬注入,有等离子体火炬向里喷射,还有把等离子体的火炬和燃料掺混以后再喷进去,各种方式国外做得非常系统,我们现在还刚刚涉及这个领域,但问题已经开始出来了。

2004年和2005年,美国南加州大学也是用瞬时等离子体来干预燃烧场,实验结果表明点火延迟时间得到了极大的缩短。俄罗斯是用磁压缩方式,实现纳秒脉宽的放电产生瞬态等离子体来干预燃烧场,控制燃烧的点火延迟时间(点火延迟时间是指当量比混合好以后,注入火源让它着火到化学能释放出来所需要的特征时间,具体的定义有较多,没有完全统一。点火延迟时间在超声速燃烧里是非常关键的一个参数,通过等离子体的加入,能够极大地改善和控制了这个参数)。美国军方也加入到这方面的研究,其军事需求牵引还是比较大的。

这里面碰到什么问题呢?高速流动。如果流动速度过高,强行制止时空气就会裂解,也就是高温气体效应出来了,接下来我们把等离子体喷注进去,等离子体和裂解的空气以及燃烧气体相混合,也就是我刚才强调的多物理流体力学问题,我们怎样建模?怎样描述?怎样简化?简化多了你把问题的实质掩盖了,简化少了



使它复杂到不可解,所以研究过程中碰到极大的困难。

美国有人做实验研究的对比数据是等离子体作用的超声速燃烧场,40 μ s 的时候我们看到,没有等离子体的基本没有开始燃烧,其他条件都是一样的,而有等离子体的已经开始燃烧了,这就非常明显地缩短了点火延迟时间,在超燃冲压发动机里面,来流进入燃烧场的时候是2马赫,如果点火延迟时间过长,这个燃烧气体都冲出喷管了,它还没有释放出化学能,这是不行的,所以要快速燃烧,我们看到这个等离子体的作用非常明显。

我们国家对冷等离子体点火助燃技术的实验研究是近几年开始的,下面是我们实验室近期做的一些工作。我想在这里强调一下,在这个研究过程中,我们得到了电工所严萍教授带领的研究小组的极大支持,所用的放电设施大部分是该小组的研究成果。

图2是火焰传播速度和脱火距离控制的实验照片。从图中看到,没有等离子体的时候,火焰有一段脱火距离,为什么有脱火距离呢?往前喷射的燃料与空气混合后可以燃烧,这个混合气是有向上的流速,而燃烧区火焰有向下的传播速度,这两个速度形成了脱火距离,当然还有混合气体的当量比问题,等等。有放电时,脱火距离基本为零,可以理解为等离子体极大地增强了火焰的传播速度,或等离子体极大地增大了预混气体的可燃极限。实际上,等离子体对火焰传播速度的增强和可燃极限的增大作用是耦合在一起的。这个效应有什么作用呢?在超燃冲压发动机里面,要保持火焰不被高速气流吹走,需要的就是增大火焰传播速度和可燃极限。



图2 钨针高压纳秒脉冲放电等离子体点火助燃(燃料为丙烷)实验照片



图 3 是用介质阻挡放电产生的冷等离子体实验照片。我们靠中间惰性介质来隔离两个电极,形成一个等离子体的放电来控制燃烧场,效果也非常明显。图 4 是用滑移电弧进行助燃实验照片,效果也很明显,但是它有一个饱和区,就是功率值增大到一定程度以后,它对燃烧效率的增强是有限的,这也是我们要优化的。

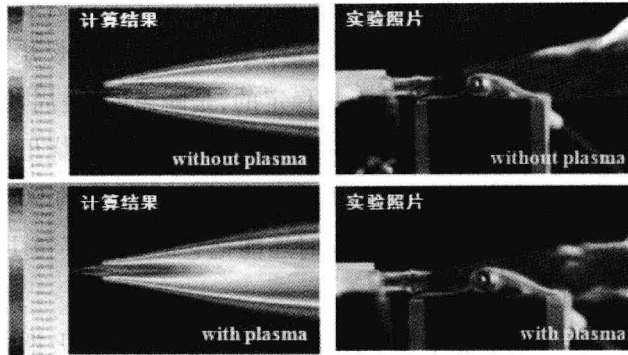


图 3 高频高压介质阻挡放电等离子体助燃(燃料为丙烷)实验照片

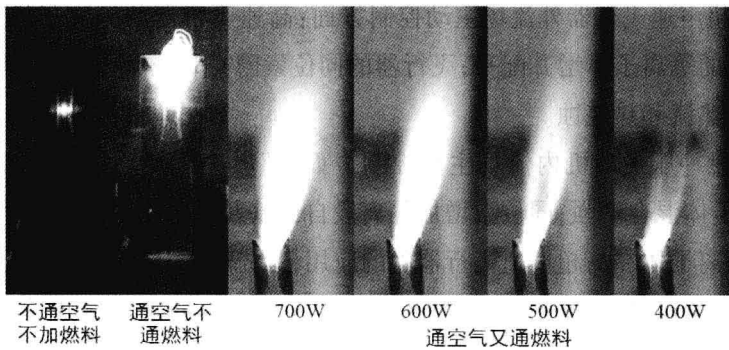


图 4 滑移弧等离子体的点火助燃实验照片

在超声速条件下,用甲烷、乙烯和丙烷三种碳氢燃料开展冷等离子体点火助燃实验研究。实验中用超燃冲压发动机直连实验台,在 2.5 马赫来流中横向注入碳氢燃料,控制等离子体参数实现有效点火并保持稳定火焰,关闭电极时火焰瞬间熄灭。这样一个实验研究告诉我们,等离子体对于点火助燃的效果明显,它可能是我



们一直在寻找的,在超燃冲压发动机里面实现快速点火和保持火焰稳定的一个很有效的技术途径。

但是,在这样一个途径中碰到了太多问题,我们可以做这样一些佐证性实验或者原理性实验,但是对它的理论预测是非常少的,对它的认知也很有限,所以我今天也借这个机会,呼吁行业专家,有这方面基础或者有兴趣做这方面研究的,合作把这些问题解决掉。这个问题归根结底就是在流动里面,加了燃烧本身就很难,现在又加了等离子体,而等离子体又不是稳定的,是瞬态的,是周期变化或者有时间特性的,这些耦合到一起以后,如何简化?我们都知道在燃烧里面,一般把几百个基元反应简化到几十个甚至几个,这几个可能决定了燃烧的90%的特征,那有没有办法把这样的问题也做一些简化,同时还能把它的90%甚至更多的特征表达出来,形成一种预测能力?

在高超声速飞行中的等离子体主动流动控制技术研究涉及非常多的问题,目前开展的比较多的应用研究主要集中在高超声速飞行器外流场主动控制,以及超燃冲压发动机内流场主动控制两个方面:

(1)高超声速飞行器外流场主动控制方面:高速飞行器的等离子体减阻增升;高超巡航弹的等离子体增升配平;飞行器的同位素隐身和减摩阻;高超飞行器的等离子体减小热流和热烧蚀。

(2)超燃冲压发动机内流场主动控制方面:超燃冲压发动机的等离子体点火助燃;等离子体混合增强;同位素增加隔离段自由基及混合增强。

谈到等离子体在高超声速飞行器中的应用,首先,看看对于外流场的控制。对于高超声速飞行器外流场的主动控制,可以涉及飞行器的减阻增升、增升配平、同位素隐身和减摩阻、高超飞行器等离子体减阻、热流控制和烧蚀控制,等等。内流场的应用,以超燃冲压发动机为例,等离子点火助燃、混合增强,还有同位素对于隔离段的大体积的注入、燃烧掺混,等等。

这些应用的关键技术也有很多,集中到等离子体主动流动控制的基础研究,主要有四个方面。这些技术的研究要牢牢地盯着等离子体主动流动控制技术的工程化要求和局限性。



(1) 等离子体产生技术,不同参数的等离子体:不同时间、空间尺度、电晕、辉光、弧光;不同方式产生等离子体:激光、微波、放电、同位素;不同约束条件下产生等离子体:功耗、体积、重量等。

(2) 等离子体与流动耦合建模及模拟技术,等离子体减波阻:含等离子体无粘性可压缩流体力学;等离子体减摩阻:含等离子体粘性可压缩流体力学;等离子体点火助燃:等离子体 + 湍流燃烧 + 高速流动。

(3) 等离子体参数测量技术。

(4) 等离子体主动流动控制实验技术,

高超声速流动或超燃实验设施

等离子体发生器

等离子体和流动参数测量系统

} 等离子体主动流动控制技术工程化

第一个关键技术就是等离子体产生技术。等离子体产生技术,有点产生技术、面产生技术、体产生技术,这样不同的空间尺度;还有时间尺度,有毫秒脉宽、纳秒脉宽甚至更短的脉宽,可以产生的机制也不同,有电晕、辉光、弧光等。这些要为我们的目的服务,比如说你要为了减阻,怎么去控制这个参数?理论上预测出来了之后,工程上要做出出来,还有不同的约束条件,比如说产生的方式上,要求有激光的方式产生,微波、高压放电、同位素产生等。再一个就是不同的约束条件下产生,比如说有功耗的限制、体积的限制、重量的限制,这就是我们面向工程化所提出的需求,不是纯粹的理论上的问题,但是如果理论上认为,5年、10年内没可能,那这事可能就要缓一缓了。

第二个关键技术是等离子体与流动耦合建模及模拟技术。前面介绍了等离子体主动流动控制出现的多物理耦合问题,多物理耦合如何建模?如何模拟并形成一种预测能力?开展深入的基础研究目的是要产生研究问题的方法,据我了解,在这个行当里做的人很多,我们也在做,但是低层次重复的多,冒尖的、走在前列的还不太,所以我在这里再次呼吁,让我们携起手来深入开展含等离子体的多物理流体力学耦合建模基础研究,形成预测能力。

第三个关键技术就是参数测量技术。对于瞬态等离子体和燃烧场强耦合状态



的测量,首先我们要确定用什么样的指标体系去描述性能和特性。有了这样的指标体系后,需要确定用什么样的技术测量它。

第四个关键技术就是等离子体主动流动控制实验技术。实验技术主要涉及三大部分,高超声速流动实验设施,包括超声速燃烧实验设施、等离子体发生器、等离子体和流体参数的测量系统,这些东西最后是要工程化的。

我们实验室叫激光推进及其应用国家重点实验室,它是科技部和总装备部共建的实验室。实验室集中在三个方向开展应用基础研究,第一个方向是激光推进应用基础,主要研究含等离子体的高温气体动力学基础问题、激光推进器工作机理、星载激光微推进器关键技术、空间碎片激光清除关键技术。第二个方向等离子体流动控制与推进技术,主要研究等离子体控制无黏高速流动、等离子体控制黏性流动、等离子体控制燃烧过程以及等离子体在发动机中应用的关键技术。第三个方向是推进流场测试与诊断技术,主要是各种非接触测量技术。这是实验室的三大方向,在这块的军事需求牵引和国家重大战略需求牵引是非常明显的,而且实验室三个研究方向的研究内容又是相耦合和关联、相依赖和相支撑的,所以我们特别希望有机会能与相关专业的专家多交流,形成可持续的深入合作。

严 萍:

刚才洪廷姬老师讲的应用对于我们中间相当一部分科研人员来讲有些生疏。等离子体流体控制和辅助燃烧近年来已经成为研究热点,从实验室的原理验证到真正能走向应用还有一段距离,认知还有欠缺。今天我们到会的有物理专业背景、电工专业背景的专家,国内从事这方面研究的大部分专家也到场了,大家可以通过沟通,明确需求,共商技术跨越,把等离子体技术真正推向应用。