

· 学科进展与展望 ·

我国燃烧领域的基础研究进展

刘涛¹ 纪军¹ 齐飞² 杨立中²
徐明厚³ 黄佐华⁴ 尧命发⁵ 姚强⁶

(1 国家自然科学基金委员会, 北京 100085; 2 中国科学技术大学, 合肥 230029; 3 华中科技大学, 武汉 430074;
4 西安交通大学, 西安 710049; 5 天津大学, 天津 300072; 6 清华大学, 北京 100084)

[摘要] 燃烧领域的基础研究对于高效清洁燃烧技术的发展、燃烧动力装置的优化设计、燃烧污染物排放控制以及火灾防治等方面都起着重要作用,关系到国民经济可持续发展、国防安全等国家核心利益。本文剖析了基础燃烧研究的科学价值、战略意义以及我国的研究现状,并对我国基础燃烧研究的长期发展目标和优先研究领域提出了建议。

[关键词] 基础燃烧研究, 能源利用, 污染物排放, 长期发展目标, 优先研究领域

1 科学价值与战略意义

燃烧是指燃料和氧化剂之间发生剧烈的化学反应,并伴有发光发热的现象。燃烧是人类最早认识并掌握的一种自然力,历史上燃烧技术的发展程度曾代表了人类征服自然界的能力和人类社会的发展水平。燃烧学是研究气体燃料、液体燃料、固体燃料的着火、熄火、燃烧过程和机理的学科,其研究目的是通过实验和理论方法了解燃烧现象的本质、主要影响因素及发展变化规律。由于燃烧是一种化学反应、流动和传热传质相耦合的物理化学现象,因此从物理和化学两方面着手的基础燃烧研究可以帮助人们从宏观和微观角度认识燃烧现象、理解燃烧原理、指导实用燃烧技术的发展,已成为燃烧研究领域乃至工程热物理领域的重要组成部分。

由于以下诸方面因素的推动,基础燃烧研究在国民经济发展、节能减排和国防安全等国家重大战略需求方面正在发挥着越来越重要的作用。首先,化石能源的燃烧为当今世界提供了超过85%的能源供应,而化石能源急剧的消耗量和有限的储量之间已经产生了严重的矛盾。特别是近年来我国国民经济飞速发展,对能源的需求量也大幅增加,在本世

纪前十年内年均增长率可达10%,远高于国际同期水平,能源安全形势尤为严峻。由于新型能源技术尚有待发展,在可预测的未来数十年内,通过化石能源燃烧提供动力或热源的格局仍然不会有大的改变。因此,优化现有燃烧器、发展新型燃烧技术、提高燃烧效率是目前最为有效的节能手段之一。另一方面,当前我国能源供应以煤炭为主,煤炭的高效利用也是急需解决的问题。其次,燃烧(特别是煤燃烧)能够产生大量的污染物,是目前主要的大气污染源,给全球环境和人类健康均造成了严重危害。例如,大气中超过90%的氮氧化物(NO_x)和超过50%的硫氧化物(SO_x)来自于燃烧过程;化石燃料的燃烧还会产生大量的碳烟(Soot)、多环芳烃(PAH)和温室气体。作为解决燃烧污染物排放问题的关键,清洁燃烧技术的发展离不开基础燃烧研究的理论指导。再次,燃烧在国防领域具有极为重要的应用,特别是在航空和航天领域,如新一代航空飞机研制以及争夺外层空间控制权的高超声速飞行器研制的国际竞争中,航空发动机和超燃冲压发动机设计、飞行器安全运行、先进航空燃料设计等核心问题的解决均离不开航空燃料的热解、低温氧化、高温氧化和燃烧数值模拟等基础燃烧研究课题的发展。此外,燃烧还在运输、热电、制造等多种工业领域有着广泛的应用,并在家庭用暖、垃圾焚化、火灾

本文于2012年9月7日收到。

安全等诸多领域发挥着重要影响,基础燃烧研究的进步对于提升行业竞争力和民众生活质量有着举足轻重的作用。

针对上述研究需求,目前国际基础燃烧研究的热点研究方向涵盖燃烧化学反应动力学、碳烟和大分子燃烧污染物形成机理、燃烧诊断、层流火焰、湍流火焰、异相燃烧、喷雾及液滴燃烧、爆震及超音速燃烧、火灾科学、静止燃烧及环境影响、内燃机及燃气轮机燃烧、燃烧新技术及反应流等,最高水平的研究工作主要发表于国际燃烧学会主办的《国际燃烧会议论文集》和《燃烧与火焰》两大权威期刊。

2 我国基础燃烧的研究进展

回顾 25 年的发展历史,国家自然科学基金在促进我国基础燃烧研究方面发挥了重要作用,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)工程热物理学科对燃烧领域的基础研究给予了持续资助。2000 年以前,由于我国基础研究经费较为缺乏,研究人员没有条件全身心地投入基础研究,因此从事基础燃烧研究的力量较为薄弱,研究方向注重工程和应用,高水平的研究成果不多。这种状况制约了我国燃烧技术的进步,并影响了我国燃烧学科在国际上的学术地位。针对这种状况,工程热物理学科基于国家自然科学基金支持基础研究的基本定位,在 2000 年组织了燃烧领域研讨会,并于 2001 年组织了香山科学会议,邀请国内外著名燃烧专家讨论如何加强我国燃烧领域的基础研究,以期逐步提高我国在燃烧领域的国际地位。从 2002 年起,学科还借助中国工程热物理学会燃烧学术年会这个平台,积极宣传基础研究的重要性,进行国家自然科学基金燃烧领域资助项目的交流,扩大国家自然科学基金的影响,鼓励更多的燃烧研究者以在《国际燃烧会议论文集》和《燃烧与火焰》等燃烧领域顶级国际期刊发表学术论文为目标,进行高水平的基础研究。

燃烧学为工程热物理学科体量最大的一个分支,每年自然科学基金项目的申请数和资助数都占本学科总量的 25% 左右。自 2000 年起至今,工程热物理学科对燃烧领域共资助面上项目 596 项,青年基金 297 项,国家杰出青年科学基金 8 项,创新群体 1 项,重点项目 12 项,国际合作重大项目 7 项;资助经费也从 2000 年的 473 万元增加到 2012 年的 5878 万元。经过 10 余年的努力,我国的燃烧基础研究已经有了突破性的进步,这从《国际燃烧会议论文集》和《燃烧与火焰》两刊的发表论文数量上可以

得到鲜明地展示。如图 1 所示,1980—2000 年间我国在两刊上共发表论文 34 篇。进入 2000 年以后,发表论文数量逐年增加,2001—2012 年间共发表论文 201 篇,为前 20 年发表论文总量的 6 倍,占全球总论文数的比例从 1980—2000 年间的 0.6% 提高至 2001—2012 年间的 4.5%,近 4 年间(2009—2012)更是达到 8%;年发表论文数已从本世纪初的全球第 10 名提高为近年来的全球第 3 名,仅次于美国和德国两大传统基础燃烧研究强国。我国基础燃烧研究的巨大进步也大幅提升了我国在燃烧领域的国际地位,国际燃烧学会的核心管理机构——国际燃烧学会理事会在 2012 年 7 月份进行的理事增补工作中为我国增加 1 个名额,使我国在国际燃烧学会理事会中的理事人数达到 2 人,仅次于美国位居全球并列第 2 位;在 2012 年 7 月 29 日至 8 月 3 日于波兰华沙举行的第 34 届国际燃烧会议上,中国科学技术大学齐飞教授应邀做了时长 1 个小时的大会特邀报告,这是自 1928 年第 1 届国际燃烧会议举办以来我国学者首次获邀做大会议特邀报告;在 2010 年 8 月 1 日至 8 月 6 日于北京举行的第 33 届国际燃烧会议上,华中科技大学徐明厚教授应邀做了时长为 45 分钟的主旨报告。值得一提的是,我国研究人员在燃烧化学反应动力学、燃烧诊断技术、煤燃烧、发动机燃烧、火灾科学等多个热点基础燃烧研究方向上开展了大量研究工作,研究成果已达到国际水平,成为国际上进行基础燃烧研究的重要基地,具体研究进展如下。

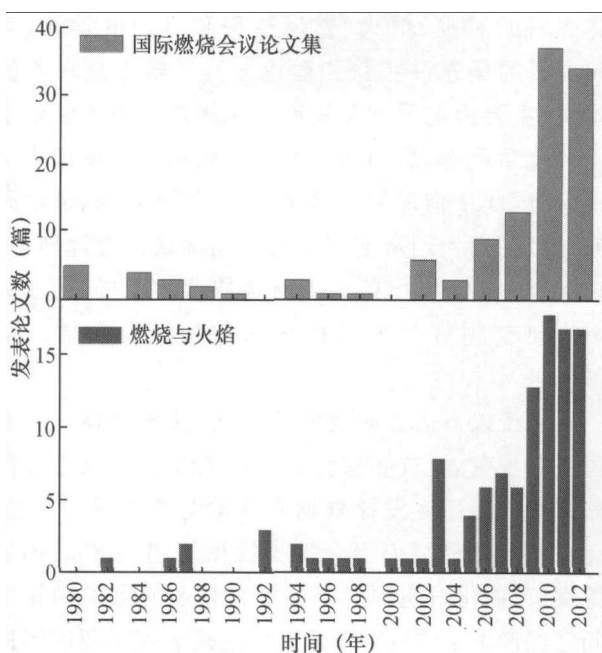


图 1 1980 年以来我国在《国际燃烧会议论文集》(双年刊)和《燃烧与火焰》(月刊)上发表的第一单位论文统计

2.1 燃烧化学反应动力学和新型燃烧诊断技术的研发

燃烧化学反应动力学以探索微观燃烧结构(包括物种的分子结构和浓度等信息)、发展燃烧动力学模型为主要研究目标,以各类实验室模型燃烧装置为主要实验平台,以燃烧诊断技术为主要研究手段,其研究成果燃烧动力学模型是燃烧数值模拟工作的重要组成部分。关键问题在于燃烧体系的高度复杂性,特别是存在大量的物种,只有准确鉴别它们的分子结构并精确测量它们的浓度分布,才能够发展出准确的燃烧反应动力学模型,从而完成对燃烧过程的定量描述和精确数值模拟。解决上述问题需要燃烧诊断技术的发展,但包括光谱、色谱和质谱在内的传统燃烧诊断技术只能对特定类型的中间体进行探测,无法完成全面鉴别各类中间体并探测其浓度的重任。

同步辐射真空紫外光电离质谱技术是一种于2002年被引入燃烧研究的新型燃烧诊断技术,借助于同步辐射能量分辨率好、光子能量可调、真空紫外波段光强高等优点,能够同时对自由基、同分异构体和多环芳烃等中间体进行检测,探测灵敏度高,是一种强大的燃烧诊断方法。但长期以来,该技术仅应用于低压预混火焰一种燃烧研究体系,而燃烧学是涵盖低压、常压和高压等多种压力条件,燃料氧化剂之间预混、部分预混和非预混等不同混合模式,热解、低温氧化和火焰等多种反应氛围的交叉型学科。基于这一问题,中国科学技术大学研究人员自2003年以来着力于将同步辐射真空紫外光电离质谱技术应用于流动反应器热解、射流搅拌反应器低温氧化、层流预混火焰、同轴扩散火焰、催化辅助燃烧、多环芳烃诊断等多种燃烧研究体系,为解决相关基础燃烧研究问题提供帮助。通过近年来的研究,厘清了多种碳氢燃料、生物质燃料和含氮燃料的热解、低温氧化、层流预混火焰、扩散火焰等燃烧体系中的化学结构,为这些燃料的燃烧模型的发展提供了充分的实验依据,获得了高准确性的燃烧模型,从而为发动机设计、高超声速飞行技术发展、燃烧污染物排放控制等工程燃烧研究提供了理论指导。相关成果获得了国际燃烧界的广泛关注和高度评价,被誉为“近年来燃烧诊断技术最重要的进展”。

2.2 煤燃烧基础研究进展

煤燃烧的基础研究对于提高我国能源利用效率和改善能源利用中污染物排放问题均具有重要意义。近十年来,我国在煤燃烧的基础研究领域取得了一系列的成就。为解决温室气体排放问题,研究

者针对氧/燃料燃烧、化学链燃烧等新型燃烧技术开展了大量的工作。华中科技大学等多家单位针对氧/燃料燃烧方式下燃烧特性和辐射传热特性与常规空气燃烧方式的差异开展了研究工作,探索了 O_2/CO_2 条件下煤焦着火特性、燃烧机理及污染物排放特性等一系列问题。研究发现,除了辐射特性的差异外,着火前 O_2/CO_2 气氛下煤焦的反应性低于常规空气气氛下的煤焦,这是造成着火延迟的另一主要原因。东南大学、中国科学院工程热物理研究所等多家单位针对化学链燃烧的载氧体、反应器及燃烧系统开展了分析和研究,研究发现目前应用最多的4种载氧体按反应性依次排序为 $NiO > CuO > Fe_2O_3 > Mn_2O_3$ 。

为解决煤燃烧中易挥发和有毒有害重金属(如Hg、As、Cr等)、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等新型燃煤污染物的排放问题,我国学者重点围绕重金属的赋存形态、氧化反应动力学、反应机理及在线测试及分析等方面开展了深入的研究;同时集中开展了新型燃煤污染物 PM_{10} 形成与控制方面的研究,主要围绕煤中矿物元素存在形式、粒度、组分及赋存形态、燃烧气氛和温度等因素对 PM_{10} 生成的影响开展了大量的工作,发现燃煤颗粒物呈3模态分布,创新性地提出了基于铝元素粒径分布的颗粒物模态识别方法,研究了细颗粒物在燃烧炉内沿程变化特性,并深入研究了颗粒物在声场、磁场、温度场和相变等作用下的演化规律等。此外,针对常规污染物 NO_x ,在我国典型煤种燃烧过程中含氮官能团的释放及转化规律、燃烧过程中 NO_x 的形成、分解以及控制机理等方面的研究同样取得了长足进步。

此外,我国学者在新型煤燃烧分析测试方法的开发及应用方面也取得了明显进展。例如,通过对原煤、煤焦和煤灰的计算机控制扫描电镜(CCSEM)分析,深入研究了热解、燃烧过程中,煤中矿物质的迁移转化规律;利用X射线光电子能谱(XPS)技术深入研究了 O_2/CO_2 和 O_2/Ar 气氛下煤焦中氮的赋存形态和定量迁移规律;借助X射线吸收近边结构谱(XANES)技术研究了 O_2/CO_2 条件下煤中有机Cr生成6价Cr的反应机理和途径等。

2.3 内燃机燃烧的基础研究进展

中国内燃机燃烧基础研究在20世纪80年代初随着我国改革开放和全国科学技术大会召开而进入了一个新的发展阶段。在国家自然科学基金的资助下,我国内燃机燃烧基础研究实现了从小到大、从弱到强、从跟踪国际研究到开创性研究的转变,先后承

担了“攀登计划”、国家自然科学基金重大/重点项目等一系列基础研究项目,使我国内燃机燃烧基础研究成为国际内燃机燃烧基础研究的一支重要力量,并在天津大学、清华大学、上海交通大学、西安交通大学等多家单位建立起一批各具特色的内燃机燃烧基础研究基地。随着国际内燃机燃烧基础研究的发展和我国汽车、内燃机工业的迅猛发展以及国家对基础研究投入的增加,我国内燃机燃烧基础研究在近10年间取得了长足的发展,研究工作瞄准国际内燃机燃烧研究的关键基础前沿科学问题,在燃油喷雾的机理阐明和优化、喷雾与缸内湍流的相互作用机理、均质混合气压燃着火和燃烧控制策略、燃料与燃烧/排放的作用机理、内燃机燃烧与热力学边界控制和燃烧化学反应动力学机理、缸内可视化与燃烧过程的解析、燃料着火与火焰传播规律等方面取得了重要研究进展,在国际内燃机燃烧基础研究中发挥了重要作用。

目前,提高内燃机热效率成为国际内燃机界首要课题,内燃机燃烧向超高燃烧压力、高密度空气与废气稀释、多元燃料适应性的低温燃烧方向发展。我国内燃机燃烧基础研究正在从燃烧物理和燃烧化学的角度开展基础性研究,其基本思路是通过解析燃料在复杂热物理场条件下的物理过程和化学过程,提出内燃机燃烧过程优化的新途径和新方法,发展燃烧新技术,改善和优化内燃机燃烧过程。为此,我国各内燃机燃烧基础研究基地在研究手段提升和高水平队伍建设等方面都有很大的投入,吸引了一大批海外内燃机燃烧基础研究的高水平人才回国从事内燃机燃烧基础研究。国家自然科学基金也对具有前瞻性、基础性和引领性的内燃机燃烧基础研究给予了重点支持。我国内燃机燃烧基础研究将会迎来一个高速、高质量发展期,实现高水平基础研究带动燃烧技术创新的新局面。

2.4 火灾科学基础研究进展

火灾是一种灾害性的燃烧现象,其孕育、发生和发展包含着流动、相变、传热传质和化学反应等复杂的物理化学变化,并可能发生轰燃、回燃、阴燃、飞火、火旋风和扬沸等各种复杂的特殊火现象。我国研究人员依托中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,致力于探索危害人类社会、自然资源和生态环境的火灾问题,深入研究火灾孕育、发生和发展的机理和规律,发展先进火灾防治技术。近年来,我国在高原火灾动力学机理、能源利用过程中火灾安全问题、油池火燃烧特性、建筑保温材料燃烧特性、森

林与城市交界域火灾安全等火灾科学基础研究方向上取得了突出的成绩,在国际燃烧领域产生了重要影响。2012年,该实验室总计有10篇第一作者论文被第34届国际燃烧会议接受发表,论文数量位居国际火灾研究机构的首位。

高原火灾研究面向我国火灾安全的重大需求,是国际上近年来的研究热点。火灾科学国家重点实验室2009年在西藏建立了国际上首个高原火灾安全研究的实验基地,全面开展高原低压低氧条件下的火灾行为特殊性和复杂性规律的研究。关于高原火灾主题的多篇研究论文连续在第32、33和34届国际燃烧会议接受发表,展现了火灾科学国家重点实验室在高海拔低压低氧特殊条件下的热解和火焰动力学、池火和固体可燃物燃烧特性以及着火问题的特色研究工作。国际火灾安全科学学会会刊 *Fire Safety Journal* 也即将专门设立一期“高原火灾研究”特刊,并确定由该实验室主持特刊的编辑工作,显示出该实验室已成为引领该前沿研究领域的研究机构。

火旋风和多火焰燃烧均属森林与城市交界域火灾安全领域的重要前沿性问题,火灾科学国家重点实验室建立了世界上尺度最大的火旋风模拟实验系统,成功实现了对中尺度火旋风的实验模拟及其演化行为的建模,在多火焰燃烧相互作用行为与规律、火旋风的基本燃烧机制等方面持续取得重要进展,多篇研究论文在国际燃烧会议上连续发表,2012年最新一期的国际火灾安全科学学会 *Newsletter* 也以封面文章专题报道了该实验室关于多火焰燃烧诱发火旋风的研究工作。

3 长期发展目标及优先研究领域

3.1 长期发展目标

结合我国基础燃烧研究的现状和研究基础、国际基础燃烧研究发展态势以及国家战略需求,基础燃烧研究领域的长期发展目标应为:建立一支结构合理、精干和稳定的基础性研究队伍,支持研究者开展开创性、引领性的基础研究,解决目前权威期刊论文接收率较低的问题;针对目前高水平研究集中于少数几所高校的问题,深化国内国际合作并增强基础燃烧研究基地的引领作用,全面提升后续梯队单位的基础燃烧研究实力,扩大学科影响力;在整体提升我国基础燃烧研究国际地位的同时,力争引导国际燃烧学科的发展方向,为我国能源、环境、安全、国防等相关领域核心问题的解决奠定科学基础、指导技术发展方向。

3.2 优先研究领域

近期,建议选择下列优先研究领域:

(1) 基础燃烧理论。优先研究方向:低碳燃料、生物质燃料和混合燃料的着火特性和层流燃烧;湍流-复杂化学反应相互作用和湍流多相燃烧的理论模型及数值模拟;爆震燃烧模式理论;燃烧理论在工程实际燃烧问题中的应用。

(2) 燃烧化学反应动力学。优先研究方向:不同温度和压力条件下基元反应速率常数的测量和计算;实用运输燃料及其替代燃料组分、生物质燃料、含氮燃料的详细燃烧动力学模型发展;固体推进剂和吸热型碳氢燃料的热解和详细化学反应动力学模型发展;金属粒子(铝、硼)详细动力学模型发展;新型高能物质的燃烧机理和动力学模型发展;新型燃烧技术中的化学反应动力学研究。

(3) 气、液燃料燃烧。优先研究方向:内燃机新型燃烧理论与燃烧控制;燃料着火与火焰传播;喷雾特性与雾化机理;石油替代燃料发动机燃烧与排放

基础理论;燃气轮机燃烧基础理论与燃烧控制技术;航空及特种燃烧发动机理论及相关基础;微尺度、微重力燃烧基础理论及其控制。

(4) 固体燃料燃烧。优先研究方向:煤的燃烧;燃煤污染物的形成机理和控制技术;基于煤炭的高效清洁利用技术;其他固体燃料的高效燃烧及利用;固体燃料燃烧及利用过程的理论及数值计算;微尺度条件下固体燃料燃烧理论及控制。

(5) 火灾科学。优先研究方向:复杂受限空间内火蔓延和烟气输运的机制与规律;开放空间大尺度火灾的发展与突变规律;特殊环境和条件下火灾防治的热物理基础问题;能源利用中的火灾基础科学问题等。

(6) 燃烧诊断。优先研究方向:层流火焰污染物的光谱和质谱诊断;基于现代分析工具的原位诊断技术的发展;X射线瞬时成像技术和X射线小角/广角散射等新型燃烧诊断技术的发展;适用于工业燃烧过程及新型燃烧装置的燃烧诊断技术的发展。

DEVELOPMENT OF CHINA'S FUNDAMENTAL RESEARCH IN COMBUSTION

Liu Tao¹ Ji Jun¹ Qi Fei² Yang Lizhong²
Xu Minghou³ Huang Zuohua⁴ Yao Mingfa⁵ Yao Qiang⁶

(1 National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085; 2 University of Science and Technology of China, Hefei 230029;

3 Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 4 Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049;

5 Tianjin University, Tianjin 300072; 6 Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Fundamental research in combustion is crucial for the development of effective and clean combustion techniques, optimal designs of combustion-driven power devices, control of pollutant emissions from combustion, fire safety and so on, which have positive effects on China's core interests such as sustainable development of economy and national security. This paper introduces the scientific interests, the strategic significances and the research progresses in China of the fundamental research in combustion. Furthermore, long-term objectives and encouraged research areas are also suggested in this paper for the development of China's fundamental research in combustion.

Key words fundamental research in combustion, energy utilization, control of pollutant emissions, encouraged research areas

(上接第 324 页)

regional water resources allocation based on water networking technology, interaction mechanism between agricultural water use and eco-environments. Suggestions are proposed on carrying out basic scientific researches and establishing experimental and monitoring networks for agricultural water resources utilization and data platform.

Key words water resources, high efficient utilization, food production, scientific issues