

# 燃烧 :一个不息的话题

## ——同步辐射单光子电离技术在燃烧研究中的应用\*

齐 飞<sup>†</sup>

( 中国科学技术大学国家同步辐射实验室 合肥 230029 )

**摘 要** 燃烧应用于工业、农业、交通运输、国防等各个领域,提供了当今社会极大部分的能量需求. 100 多万年前人类就开始利用燃烧,人类研究燃烧已经有 150 多年的历史. 本文介绍了将同步辐射真空紫外单光子电离技术结合分子束取样,应用于燃烧研究中,可以探测到燃烧中的各种中间体,包括稳定的和不稳定的产物. 通过扫描光子能量,测量产物的光电离效率谱,可以区分其同分异构体. 因此,利用这种新的诊断技术,在 150 年后的今天,我们仍然可以在火焰中发现很多新的燃烧中间体,为发展燃烧动力学模型提供精确的实验数据. 最后,展望该方法在其它学科中的可能应用.

**关键词** 同步辐射,真空紫外单光子电离,燃烧,火焰中间体

# Combustion, a never extinguishing topic

## ——Combustion study with synchrotron radiation single-photon ionization technique

QI Fei<sup>†</sup>

( National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China )

**Abstract** Combustion is applied in industry, agriculture, transportation, and defenses *et al.*, which at present provides most of our worldwide energy support. Human began to utilize combustion about one million years ago, and they studied the combustion about 150 years ago. In this review article, we introduce a new technique, synchrotron radiation vacuum ultraviolet single-photon ionization combining with molecular-beam mass spectrometry, applied to combustion study. The new method can detect the flame intermediates including stable and unstable species. Isomers can be distinguished with measuring photoionization efficiency spectrum (PIE). Thus, new compounds can be found even after 150 years of flame research, which can be helpful to develop kinetic model. Finally, some other applications are prospected with this new technique.

**Keywords** synchrotron radiation, VUV single-photon ionization, combustion, flame intermediates

## 1 燃烧研究的历史

火的使用及其发展有悠久的历史. 我国上古关于燧人氏钻木取火的传说,欧洲古代关于普罗米修斯取火给人间的神话,以及各种考古发掘,都间接或直接地表明,人类祖先远在无文字可考的旧石器时代就已学会了用火,火是人类最早征服的自然力之

一. 我国古书《庄子》中有“木与木相摩则然(燃)”的说法<sup>[1]</sup>. 恩格斯说过“只是人类学会了摩擦取火之后,人才第一次使某种无生命的自然力为自己服

\* 中国科学院“引进海外杰出人才”基金、中国科学院创新基金、国家自然科学基金(批准号:20473081,20533040)、留学回国人员基金、教育部博士点基金资助项目

2005-11-23 收到

<sup>†</sup> Email: fqi@ustc.edu.cn

务”<sup>[2]</sup>。火的使用使人类脱离了茹毛饮血的野蛮状态而进入文明时代。当火的使用由生活的领域进入到生产领域之后,燃烧开始形成一门独立的科学和技术,并有了迅速的发展。近几十年来,燃烧被广泛地应用于能源、航空、冶金、化工、机械等国民经济中,用来发电,产生动力,冶炼,机械加工,制备化工产品以及军事武器等。

但是,燃烧在给人类提供所需能量的同时也带来了一些负面影响,主要体现在燃烧可造成严重的环境污染<sup>[3,4]</sup>。燃烧过程产生的污染物 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、碳黑气溶胶、残余烃类、烟微粒等都会恶化环境、危害人类及其它动物的健康<sup>[5]</sup>。并且,我国在热处理能耗、热处理效率等方面与西方发达国家相比还有相当大的差距,热处理能源结构也不够合理。因此,如何有效地利用能源,提高能源利用效率,以及控制燃烧过程减少污染物的排放、保护环境成为当前燃烧研究的首要之急。

什么是燃烧?各种强烈放热反应或类氧化反应(氮化,氟化,氯化等),强烈放热分解反应(如联氨分解)或者其它强烈放热反应,其中有基态和激发态的自由基、原子、电子及离子出现,并伴有光辐射现象者,称为“燃烧”<sup>[6]</sup>。

虽然人类用火已有约100万年的历史,但对燃烧的科学认识则不过才三百多年的历史,这是由于燃烧是一个受多种物理和化学因素控制的复杂过程<sup>[7]</sup>。18世纪中叶以前,人们对燃烧现象的本质停留在燃素说的理论上,把物质能否燃烧归结为是否含有一种特殊的物质——“燃素”。1777年,拉瓦锡发现氧气,根据实验观测,提出氧化说,即燃烧是物质的氧化,这一概念成为创建燃烧理论的萌芽。到了19世纪,赫斯等人发展了热化学和化学热力学,这时把燃烧装置作为热力学体系考察其初态、终态间关系,阐明了燃烧热、产物平衡组分及绝热燃烧温度的规律性。从20世纪初到30年代,开始了研究燃烧动态过程的理论,刘易斯等人阐明了燃烧反应动力学的链式反应机理,发展了火焰传播概念,并提出最小点火能量等基本定义,奠定了描述火焰的物理基础。三十年代到四十年代间,建立了着火和火焰传播的经典燃烧理论,同时发展了湍流燃烧理论,这时人们逐渐认识到,燃烧过程是反应动力学和传热传质相互作用的过程。至此,人们开始按照自己的专业需要去研究燃烧中某一方面的问题。例如物理热能机械方向的将经典流体力学、气体流动学、传热传质等知识用于燃烧的研究;化学专业的具体认识燃烧化

学反应过程,研究燃烧热力学、动力学、燃烧反应机理及反应平衡问题,特别是随着新的燃烧诊断技术的发展,如激光诊断、色谱-质谱技术,使得人们对燃烧机理的了解不断深入和完善。与此同时,70年代计算机的出现,人们开始建立燃烧的数值模拟方法及数值计算方法。可以看出,运用经典物理理论、数学模型、燃烧诊断技术这三样武器,人们将对燃烧领域有更完善和更深入的认识了解,从而会使燃烧理论由描述性的、半经验性的科学走向本质性的、严谨性的科学。

## 2 燃烧诊断技术的发展

目前燃烧诊断方法主要可以归纳为两大类:一类是原位光谱诊断法(in situ optical spectroscopic probes),另一类是取样分析法(extractive sampling method)。原位光谱法主要包括激光诱导荧光(LIF)<sup>[8]</sup>、光腔衰荡光谱(cavity ring-down spectroscopy,CRDS)<sup>[9,10]</sup>和相干反斯托克斯拉曼光谱(coherent anti-Stokes Raman spectroscopy,CARS)<sup>[11]</sup>等。光谱法的优点是在测量过程中不扰动火焰的结构。但对于不同的测量对象,由于光谱的范围不同,必须重新调整激光的波长,这也是光谱法的缺点之一。光谱方法非常适合于测量小分子和自由基的浓度,例如 $\text{NO}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{OH}$ 、 $\text{CH}$ 和 $\text{CH}_2$ 等<sup>[8-11]</sup>。图1所示为利用激光诱导荧光光谱法测量火焰中 $\text{CH}$ 自由基的 $\text{B}^2\Sigma-X^2\Pi$ 带系中(0,0)激发带的R支光谱,LIF可以清楚的分辨 $\text{CH}$ 自由基的转动结构。图2所示是利用LIF测量 $\text{CH}_4/\text{N}_2\text{O}$ 火焰中 $\text{NCO}$ 自由基的光谱,图中的很多谱峰相互叠加。在典型的燃烧温度(500—2000 K)范围内,大分子由于具有较大的布居函数和较小的转动常数,导致光谱峰相互重叠而变得毫无规则,因此光谱诊断方法无法定量地测量大分子,如较大的碳氢化合物和多环芳烃,而多环芳烃正是形成碳黑气溶胶的前驱体。

取样分析法通常结合质谱、气相色谱或色-质联用等仪器。取样法与质谱相结合被证明是一种有效的、普适的实验技术,已被广泛地应用于化学、物理和生物研究中。取样法在燃烧研究中的应用,通常有两种:一种是利用毛细管取样,这种方法对火焰结构的扰动较小,但只能探测到一些稳定的分子;另一种方法是利用复杂的超声分子束进行原位取样,取样后分子无任何碰撞,可以有效地冷却分子和自由基,因此能准确地探测燃烧过程中产生的各种产物

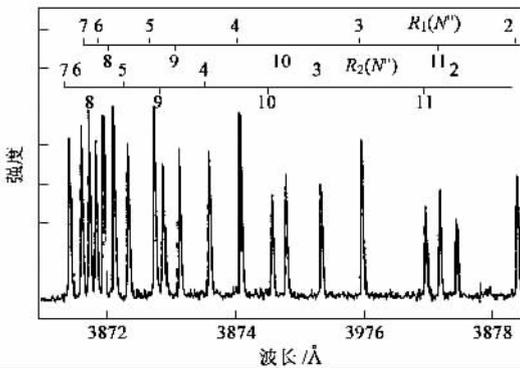


图1 CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> 火焰中 CH 自由基的激光诱导荧光光谱<sup>[8]</sup>

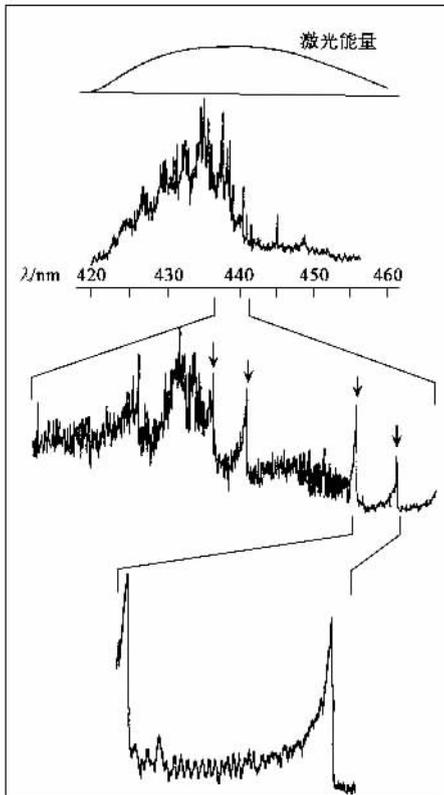


图2 利用 LIF 测量 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>O 火焰中 NCO 自由基的 A<sup>2</sup>Σ<sup>+</sup>-X<sup>2</sup>Π<sub>i</sub> 电子跃迁激发谱<sup>[8]</sup>(上图:激光扫描整个染料范围;中图:激光扫描 4 nm 宽的 000←000 振动带;下图:激光扫描 0.45 nm 宽的转动带<sup>o</sup>P<sub>12</sub>)

(稳定的和不稳定的),包括自由基及燃烧的中间产物,这种方法称之为分子束质谱法(molecular-beam mass spectrometry, MBMS)<sup>[12]</sup>。为了发展和测试燃烧过程的动力学模型,将 MBMS 应用于低压、层流预混火焰的研究已经有三十多年的历史。传统的 MBMS 仪器使用电子束轰击电离或激光光电离。电

子束轰击电离具有简单、经济等优点,但其劣势也相当明显:首先它会使大的分子解离成很多小碎片,从而影响对母体分子的探测;其次电子束轰击电离几乎探测不到燃烧产生的中间产物,如自由基等;并且它难以产生 10.0 eV 以下的电子束源,能量分辨率较差,所以无法分辨具有相同质量不同结构的分子,因此这种方法不具有选择性。而激光光电离也存在一些无法避免的缺点,比如激光的调谐范围较窄,在真空紫外(VUV)波段不能连续、任意可调;在 VUV 波段,激光的平均光子强度较低,而且激光光电离会引起多光子过程等。

### 3 同步辐射单光子电离技术及其在燃烧中的应用

同步辐射是 20 世纪 50 年代以后兴起的先进光源,具有高亮度、高准直性和波长连续可调等特性,并且 VUV 光电离是单光子过程。因此,近年来基于同步辐射的特性而发展出的同步辐射-分子束质谱(SR-MBMS)技术,可以克服电子束轰击电离和激光光电离的很多缺点,是一种非常适合于燃烧机理研究的新方法<sup>[13,14]</sup>。

由于 SR-MBMS 是单光子技术,能避免在电离时产生碎片,因此能够广泛探测燃烧产物,尤其是各种中间体。图 3 所示为分别利用电子束轰击电离和同步辐射单光子电离所得到的丙烷的质谱,前者的质谱中存在大量的碎片离子峰,而后的质谱中只存在丙烷的分子离子峰。SR-MBMS 单光子过程可以研究在燃烧过程中起关键作用的自由基如 CH<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>、HCO、C<sub>3</sub>H<sub>3</sub>、C<sub>3</sub>H<sub>5</sub>、C<sub>5</sub>H<sub>5</sub> 等等。如果利用电子束轰击电离,很难确定质谱上的峰是来自电离过程中产生的碎片离子,还是燃烧本身产生的自由基。

碳氢化合物有很多同分异构体,质量相同,但对应的是不同的分子,例如 C<sub>3</sub>H<sub>4</sub> 可能是丙炔(CH<sub>3</sub>-C≡CH),也可能是丙二烯(CH<sub>2</sub>=C=CH<sub>2</sub>)。但在质谱上这两个分子会占据同一个位置,只有区分出每种同分异构体并测量出各自的浓度,才能够发展燃烧动力学模型。目前,商品化的质谱都采用电子轰击电离,无法区分同分异构体。对于 C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>,丙炔和丙二烯虽然元素组成相同,但其化学结构不同,物理化学性质也不同,因此其表现出来的物理化学性质也应该不一样,例如丙炔的电离能是 10.36eV,丙二烯的电离能是 9.69eV。利用同步辐射的波长可调性,通

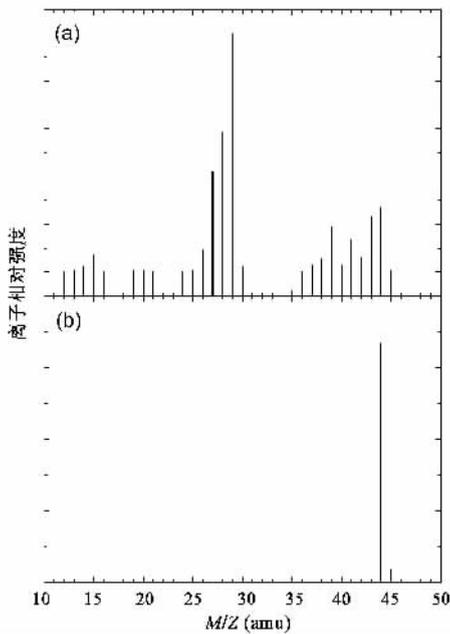


图3 丙烷的质谱图 (a) 70 eV 电子轰击电离的质谱 (b) 同步辐射单光子电离所得质谱(光子能量为 11.20 eV),质量数 44 的峰为丙烷,质量数 45 的峰为含一个<sup>13</sup>C 的丙烷

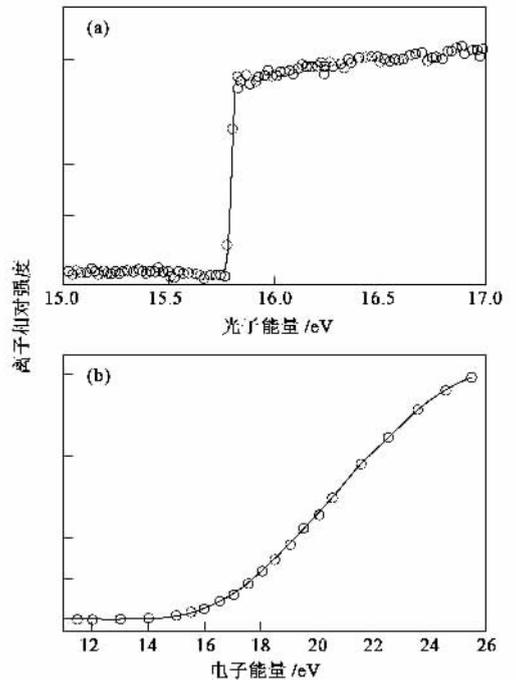


图4 氩的电离效率曲线 (a) 同步辐射单光子电离的效率曲线 (b) 电子轰击电离的效率曲线

过测量物质的光电离效率谱(PIE)来测量电离能,可以区分同分异构体,这是利用同步辐射研究燃烧的另外一个优点.

如图 4(a)所示,通过扫描光子,测量 Ar 离子的信号强度随光子能量变化的曲线,称之为光电离效率谱.如果光子能量小于 Ar 的电离能,则没有离子信号,一旦光子能量大于 Ar 的电离能,离子信号会上升,其“拐点”(称之为阈值)处所对应的光子能量即为 Ar 的电离能.在图 4(a)中可以清楚的测得 Ar 的电离能为 15.76 eV.如果利用电子轰击电离,通过扫描电子能量,也可以得到类似的曲线,如图 4(b)所示,由于电子束的能量分辨较差以及电离阈值附近电离截面较弱,因此很难得到一个准确电离能.而不同的同分异构体的电离能有时相差很小,因此电子轰击电离无法区分同分异构体.图 5 是苯/氧火焰中质量数为 40 的光电离效率谱,从图中可以看到两个明显的阈值,分别对应于丙炔和丙二烯.

在燃烧过程中会产生很多不同的燃烧中间物,图 6 所示是叔丁醇/氧气火焰中测得的质谱图.我们可以在固定的取样位置,通过测量光电离效率谱,得到质谱中每一个峰对应的物质;也可以在固定的光子能量下,扫描燃烧炉的位置,得到每一个峰的空间分布,结合光电离截面的数据,可以得到每种产物的

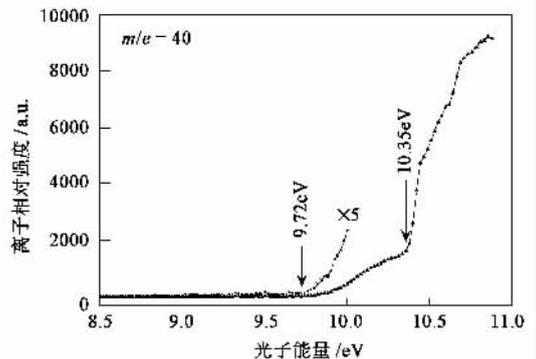


图5 苯/氧火焰中质量数 40 的光电离效率谱

绝对浓度分布.

2002 年开始美国桑迪亚国家实验室、康奈尔大学、麻州大学和劳伦斯伯克利国家实验室的科学家联合在伯克利的第三代同步辐射光源 - 先进光源 (the Advanced Light Source, ALS)上,建立了世界上第一个同步辐射燃烧实验站,利用同步辐射真空紫外光的单光子电离技术,结合分子束质谱,对燃烧过程中的中间物、自由基、各种芳香烃等进行了研究<sup>[14]</sup>. 近两年来的实践证明同步辐射光电离技术与超声分子束取样相结合具有无可比拟的优越性,获得了许多重要的实验结果<sup>[13, 15-17]</sup>. 最近桑迪亚国家实验室的燃烧研究中心(Combustion Research Facili-

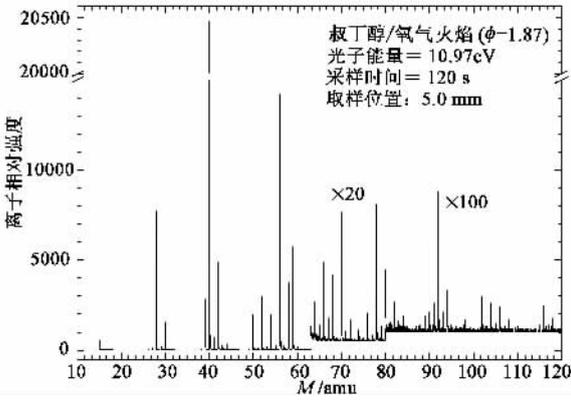


图6 叔丁醇/氧气火焰在 10.97 eV 的光电离质谱图(燃烧当量为  $\phi = 1.87$ , 光子能量为 10.97 eV, 采样时间为 120s)

ty, CRF), 将“同步辐射研究燃烧”列为该中心自 1978 年开始建设以来 25 个里程碑事件之一<sup>[18]</sup>。

### 4 我们的工作

目前我们是国内唯一一家利用同步辐射来研究燃烧过程中动力学问题的实验组。基于同步辐射单光子电离在探测中间物以及区分同分异构体中的优势, 我们对苯的火焰、乙醇的火焰、汽油及其添加剂的燃烧过程进行了研究, 发现了很多前人没有探测到的自由基, 并证实了烯醇作为普遍中间物存在于碳氢化合物的燃烧过程中。尽管早在 1880 年就曾预言烯醇应该是碳氢化合物氧化的中间物<sup>[19]</sup>, 由于缺乏有效的实验手段, 研究者们直到 1976 年才在气相化学反应中首次观察到最简单的烯醇——乙烯醇。

我们对不同种类的碳氢化合物(烷烃、烯烃、炔烃、环烃、芳香烃和醇)在不同当量  $\phi$  下的燃烧进行了系统的研究。在我们的实验中, 可以实现稳定的一维层流低压预混火焰, 通过调节燃烧炉的位置和同步辐射光的波长, 对火焰中各种自由基分别进行空间位置和光子能量扫描, 从而得到一系列的效率曲线。结果发现, 质量数为 44 的物质的 PIE 中存在两个拐点, 证明在燃烧过程中存在两种质量数为 44 的物质, 将实验所得电离能与文献数据进行比较, 可知电离能为 10.23 eV 的物质是乙醛, 而电离能为 9.30 eV 的物质就是乙烯醇(图 7)。这里需要提到的是, 由于我们所用同步辐射 VUV 光子能量在 6—24 eV 范围内, 而一般的自由基和分子的第一电离能也基本在这个区域中, 第二电离能则在这个区域之上, 故电离后的基团均为一价, 因此质荷比与基团的质量数是一致的。实验结果证明, 乙烯醇除了不存在于最简单的烃类的火焰中, 如甲烷、乙烷、丙烷等, 在较

复杂的烃类的火焰中, 都能观察到它的存在。由于我们的实验条件比较简单, 考虑到实际情况要复杂得多, 因此乙烯醇在燃烧过程的含量可能会更高。接着在质量数为 58 和 72 的物质的光电离效率谱中, 我们也观察到了丙烯醇和丁烯醇的存在。同时发现, 当碳氢化合物中的 C—C 单键所占比例增加时, 会导致烯醇的浓度降低。

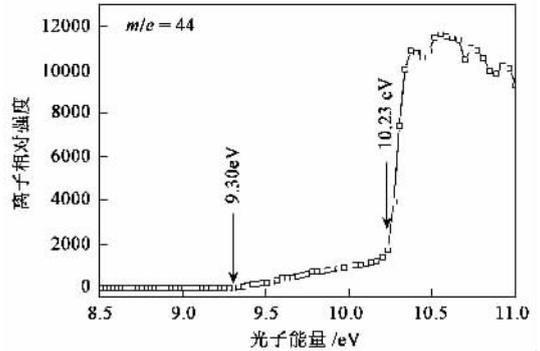


图7 质量数为 44 的光电离效率谱

这个发现的意义在于, 在确定了烯醇是碳氢化合物燃烧中的普遍中间物后, 研究者可以进一步研究烯醇在燃烧过程中所起的作用, 并对碳氢化合物氧化过程的动力学模型进行修正, 这对于燃烧理论研究和实验研究都具有很大的推动作用。这项工作是我们与美国、德国等单位合作, 于今年 6 月 24 日以封面文章的形式发表在 Science 上, 受到了科学界与媒体的广泛关注。此外, 我们在火焰中还探测到了很多不同的自由基, 如:  $\text{CH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5$ ,  $\text{HCO}$ ,  $\text{C}_3\text{H}_3$ ,  $\text{C}_3\text{H}_5$ ,  $\text{C}_3\text{H}_7$ ,  $\text{C}_4\text{H}_3$ ,  $\text{C}_4\text{H}_5$ ,  $\text{C}_4\text{H}_7$ ,  $\text{C}_4\text{H}_9$ ,  $\text{C}_5\text{H}_3$ ,  $\text{C}_5\text{H}_5$ ,  $\text{C}_5\text{H}_7$ ,  $\text{C}_6\text{H}_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_5$ ,  $\text{C}_7\text{H}_7$  等等, 有些自由基具有不同的同分异构体。

### 5 展望

21 世纪是能源的世纪, 也是环保的世纪。为了应对即将来临的能源危机, 保护日益脆弱的环境, 我们在大力开发高效、洁净的新能源的同时, 也要合理利用剩余的常规能源, 特别是主要用于燃烧的化石能源, 包括煤、石油和天然气等, 这就需要在提高燃烧效率的同时加强控制污染物的排放。利用同步辐射的单光子电离技术, 结合超声分子束取样技术和飞行时间质谱技术等, 同时密切结合理论模型的研究, 能够深入研究一些碳氢化合物的燃烧动力学, 揭示碳黑气溶胶的形成机理; 该方法也可以对含氮、含硫燃料的燃烧过程进行研究, 探测其中间物并

由此推断产生  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  等污染物的形成机理。目前研究的火焰是低压、层流预混火焰,这种火焰比较简单,非常适合于燃烧动力学模型的研究。实际的燃烧过程大都发生在 1 个大气压下或高压下,燃烧过程也复杂得多,但燃烧中间物的种类应该比较接近。在不久的将来,该方法会应用到常压、高压下的燃烧。

这种新的测量技术其实是一种光谱与质谱的组合技术,有人评论该技术是“质谱的哈勃望远镜”,除了在燃烧中的应用外,目前正在将其应用到不同的学科中。例如,化学蒸汽(气相)沉积(CVD)是一种有效的薄膜生长方法,已经得到了广泛的应用,但其中的机理还不是很清楚,已经有人将光谱、分子束质谱(主要是电子轰击电离)等应用于 CVD 过程的研究。同步辐射单光子电离与分子束质谱相结合可以应用到 CVD 过程中的研究。催化反应是固相与气相的反应,如果可以测量这些反应的中间物,就可以从理论上去研究催化反应的路径与机理,该方法也可以应用于催化反应机理的研究。另外,目前普遍存在的商品化的质谱都是利用电子轰击电离源,会带来很多的碎片峰,对于复杂体系的分析会带来一定的困难,如果利用同步辐射的单光子电离技术,可以大大的提高分析的精度,因此该技术也可以应用于分析研究中,如分析有机化合物结构、烟气分析、环境分析、等离子体化学等等。也可以与热重、色谱等其它仪器相结合,应用于各种不同的学科。甚至可以将这种技术结合电喷雾、激光解析,应用于生物大分子的研究等。最后,我们希望不久的将来会有更多的研究小组利用同步辐射单光子电离与分子束质谱相结合的技术进行燃烧与大气污染研究,并将该技术拓展到其它更多的研究领域。

致谢 感谢张允武研究员、盛六四研究员以及本组研究生杨斌、王晶、李玉阳、黄超群、卫立夏、杨锐等的帮助。

### 参 考 文 献

[ 1 ] 张子高. 中国化学史稿,古代之部. 北京:科学出版社, 1962  
 [ 2 ] 恩格斯. 自然辩证法. 北京:人民出版社,1955  
 [ 3 ] Vovelle C. Pollutants from Combustion - Formation and Impact on Atmospheric Chemistry. Dordrecht / Boston / London : Kluwer Academic ,2000  
 [ 4 ] Warnatz J , Maas U , Dibble R W. Combustion : Physical and Chemical Fundamentals , Modeling and Simulation , Experiments , Pollutant Formation. Berlin : Springer - Verlag ,2001  
 [ 5 ] Fernandez A , Davis S B , Wendt J O L et al. Nature ,2001 , 409 : 998

[ 6 ] 岑可法. 高等燃烧学. 浙江大学出版社,2002  
 [ 7 ] Fristrom R M. Flame Structure and Processes. New York and Oxford : Oxford University Press ,1995  
 [ 8 ] Smyth K C , Crosley D R. In Applied Combustion Diagnostics. Eds. Kohse - Hoinghaus K , Jeffries J B. New York : Taylor & Francis ,2002. 9 - 68  
 [ 9 ] McIlroy A. Chem. Phys. Lett. ,1998 ,296 : 151  
 [ 10 ] McIlroy A , Jeffries J B. In Applied Combustion Diagnostics. Eds. Kohse - Hoinghaus K , Jeffries J B. New York : Taylor & Francis ,2002. 98 - 127  
 [ 11 ] Dreier T , Ewart P. In Applied Combustion Diagnostics. Eds. Kohse - Hoinghaus K , Jeffries J B. New York : Taylor & Francis ,2002. 69 - 97  
 [ 12 ] Biordi J C. Prog. Energy Combust. Sci. ,1977 ,3 : 151  
 [ 13 ] Cool T A , Nakajima K , Mostefaoui T A et al. J. Chem. Phys. ,2003 ,119 : 8356  
 [ 14 ] Cool T A , McIlroy A , Qi F et al. Rev. Sci. Instrum. ,2005 , 76 : 94102  
 [ 15 ] Taatjes C A , Osborn D L , Cool T A et al. Chem. Phys. Lett. ,2004 ,394 : 19  
 [ 16 ] Taatjes C A , Klippenstein S J , Hansen N et al. Phys. Chem. Chem. Phys. ,2005 ,7 : 806  
 [ 17 ] Taatjes C T , Hansen N , McIlroy A et al. Science ,2005 ,308 : 1887  
 [ 18 ] Sandia National Laboratories. Combustion Research Facility News. 2004 ,26( 3 ) : 2-5 [http://www.ca.sandia.gov/CRF/news\\_pdf/CRFV26N3.pdf](http://www.ca.sandia.gov/CRF/news_pdf/CRFV26N3.pdf)  
 [ 19 ] Erlenmeyer E. Chem. Ber. ,1880 ,13 : 305



作者简介 齐飞,男,教授,博士生导师,1997年7月获中国科学技术大学博士学位,2002年中国科学院“引进海外杰出人才”获得者。1998年10月—2003年2月先后在美国劳伦斯伯克利国家实验室的先进光源(ALS)和美国桑迪亚国家实验室的燃烧研究中心作博士后,2003年2月回中国科学技术大学国家同步辐射实验室工作。多年来致力于同步辐射的应用研究,在ALS,参与建立了第一个将同步辐射应用于燃烧研究的实验站。2003年开始在国家同步辐射实验室建立第二个利用同步辐射研究燃烧的实验装置,主要利用同步辐射和分子束质谱技术研究燃烧过程中的中间物、燃烧产生的污染物等。近年来,在 Science, J. Am. Chem. Soc., J. Chem. Phys., J. Phys. Chem. A, Chem. Phys. Lett. 等国内外杂志发表 50 余篇。

作者简介 齐飞,男,教授,博士生导师,1997年7月获中国科学技术大学博士学位,2002年中国科学院“引进海外杰出人才”获得者。1998年10月—2003年2月先后在美国劳伦斯伯克利国家实验室的先进光源(ALS)和美国桑迪亚国家实验室的燃烧研究中心作博士后,2003年2月回中国科学技术大学国家同步辐射实验室工作。多年来致力于同步辐射的应用研究,在ALS,参与建立了第一个将同步辐射应用于燃烧研究的实验站。2003年开始在国家同步辐射实验室建立第二个利用同步辐射研究燃烧的实验装置,主要利用同步辐射和分子束质谱技术研究燃烧过程中的中间物、燃烧产生的污染物等。近年来,在 Science, J. Am. Chem. Soc., J. Chem. Phys., J. Phys. Chem. A, Chem. Phys. Lett. 等国内外杂志发表 50 余篇。