

⑪  
47-49

高温, 气体动力学, 力学

# 高温气体动力学及其前景

中国科学院高温气体动力学开放实验室主任、研究员 竺乃宜  
(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

A

**提要:** 高温气体动力学是近代力学中最具活力的新兴分支学科之一。近年来, 鉴于航空航天工业飞速发展以及高温化工、无污染燃烧、新材料加工、微机械制造等应用需求, 人们必须突破经典气体动力学框架, 将研究对象从常温下的完全气体拓展到高温下的真实气体。对高速、高焓等极端条件下高温气体非平衡流动中出现的复杂现象及相应机理的研究, 导致了物理、化学与流体力学的相互交缘。这一跨学科领域蕴藏着重大突破的可能。本文简要地介绍了这一分支学科的背景、特点、国内外研究工作现况及其应用前景。

## 一、背景

经典气体动力学的研究对象通常是常温或不太高温度下的流动, 一般可视为完善气体的流动。随着航空事业特别是五十年代以来航天高技术的发展, 高速空气动力学在克服音障、热障、黑障等重大难题的过程中取得了几次飞跃。当前又处在为克服非平衡流动、真实气体效应、超音速燃烧等重大难题的新阶段。目前使用的飞机是以每秒几百米的速度在 10 公里左右高度的低层大气中飞行, 飞行器周转流场中的温度只有几百度, 空气中的氧、氮分子没有明显变化。预计 21 世纪用于洲际飞行的空天飞机将以每秒几公里的速度在 100 公里以上高度的高层大气中飞行, 且起飞和降落需要经常性地穿越整个大气层。飞行器周围流场中的温度可高达几千至上万度 K, 飞行器表面温度最高处也可达到两、三千度 K, 局部将出现烧蚀现象。因此, 我们所要研究的对象是处于高速和高焓等极端条件下的气流, 高温下气体分子的内部自由度处于激发状态, 原子、分子间存在着解离、电离、复合等化学反应, 甚至还要考虑辐射输运和电磁效应, 气体动力学过程与物理和化学动理学过程同时存在并耦合在一起互相影响, 经典气体动力学的理论和方法已经难以处理这种真实气体中出现的复杂问题。例如, 载人航天飞机回地过程中发现, 真实气体效应不仅对气动加热有重大作用, 对飞行器气动性能亦有重大影响, 美国航天飞机气动设计未考虑真实气体效应, 因而在试飞中出现了配平攻角高出设计值一倍等气动异常现象。又例如, 高超音速飞行器再入大气层时尾迹的光、电特性, 平衡理论和非平衡理论计算出来的结果可以有数倍甚至量级的差别。超音速燃烧冲压发动机被认为是 21 世纪空天飞机最有希望的推进系统, 超燃技术的发展把气体动力学和燃烧理论的研究带进了一个全新的领域, 要求在高超音速化学反应流中实现有效的混合、点火和稳定的燃烧。

又如, 燃烧问题最初被看作是利用化学反应产生热能的过程。但是当代的能源和环境工程迫切要求实现高效和低污染的燃烧, 因为人类目前利用的能源 97% 来自燃料的燃烧, 优质能源面临在几十年内趋于枯竭的前景, 燃烧产生的有害气体与烟尘是当前人类环境污染的主要来源, 因此, 除了取得热能之外, 解决其副产物和燃烧排放有害物质的危害, 已被提到日程上并成为当代社会的一大挑战。更新的理念是把燃烧看作一个化学反应的开放系统, 通过控制所加入的物料与流动过程达到制造和合成有用的材料, 或者反过来用于处理毒物和废弃物, 即用化学反应的方法, 将有害物质焚掉。这种广泛意义下的燃烧所提出的问题已经不是传统的燃烧技术和方法能够解决的。燃烧是高温、有传热、传质和化学反应的复杂流动现象。湍流火焰传播、稳定性、多相燃烧、燃烧污染物的产生与控制等难题都要求我们必须对燃烧过程中的流体动力学和化学动理学的机理做透彻的研究。另外, 反应系统的安全问题, 也只有在化学反应流的理论框架之内, 取得规律性认识的基础上加以解决。

同样, 高温化工的发展要求人们对化学反应的研究从静态定性的描述提高到动态定量的认识, 今后将推进到人工可控制的定向化学反应新阶段, 从而带来对工业技术流程的变革。传统生产工艺中的温度都在几百度上下, 受到了局限。如果温度由  $10^2$  度升至  $10^3$  度, 化学反应的速度可以提高几个量级。此外, 反应过程可以在更高的流速下完成, 反应器的尺寸可以大为缩小而产率却可成倍提高, 为实现这一目标研究高速流动下的快速反应就非常有必要。气动力学方法在化工裂解工艺中的应用有着广阔的前途, 裂解(如制乙烯)是生产化工产品的重要方法, 许多产品的获得要求裂解过程中具有可控制的高温 and 短停留时间。气动力学的超声速混合、激波加热和膨胀冷却, 很容易将原料加热到  $2000 \sim 3000\text{K}$  高温和具有微秒级加热、冷却的能力, 再配合对化学反应松弛过程的研究, 如在化工中实用将具有重大经济和社会效益。

总之, 这些背景共同要求我们首先在一些典型的高温高

速流动和燃烧与化学反应系统条件下把非平衡流动现象和机理研究清楚,建立适用的理论框架和计算方法。

## 二、国内外现状

本世纪中期即有学者注意到用气体动力学方法研究燃烧,如 Landau 和 Zeldovich 的火焰传播理论; von Karman 及其学派提出所谓“Aerothermodynamics”这一气体动力学分支;钱学森在更广的意义下提出“化学流体力学”的概念。按现代的观点看,那时的理论实际上是化学反应流的一种渐近近似,即在化学反应特征时间  $T_{\text{反应}}$  远小于流动的特征时间  $T_{\text{流动}}$  时,把反应区约化成一种间断,称为“锋面”(front),实际流动仍按理想气体处理。本世纪 80 年代发展形成了现代化学反应流的一个新分支,它的特点是充分注意到化学反应的有限速率,把流体运动与化学反应和内态变化进行一体化处理,将动力学(Dynamics)过程与动力学(Kinetics)过程相互耦合来处理有内态变化和化学反应的远离平衡的流动问题。美国国家研究理事会批准的“美国 2000 年流体物理学”报告中指出这一新格局将给象燃烧一类的基础研究带来突破性的变化,从而把化学反应流的研究列为今后优先支持的子学科之一。与此同时,“高温气体动力学”的概念也日渐成熟,它侧重于研究高速、高焓流动中的非平衡现象和真实气体效应。“美国 2000 年航空空气动力学”报告中提出,真实气体效应是长期被忽视现在又重新引起兴趣而应特别加以重视的一个门类。由于人们越来越认识到高温非平衡流动现象和机理的研究有可能在高温化学动力学、燃烧动力学和高速空气动力学等方面取得突破性进展,近二十年来,美国 NASA、国家标准与技术研究院、许多大学实验室以及前苏联科学院热物理部、法国科学院燃烧化学与高温研究中心等国际知名的研究单位均十分重视这一领域并投入了巨大的研究力量。在深入开展基本非平衡过程和现象研究的同时,不断更新模拟实验设备的能力,逐步向高技术和未来工程所关心的复杂流动问题靠近。在大量进行数值模拟计算方法研究的同时,大力发展新型先进的光、电实验测量技术(例如:激光多普勒测速、激光拉曼散射、激光诱导荧光、电子束诱导荧光、瞬态红外成像等)。逐步深入到能够从原子、分子过程的层次来解释和研究高温化工过程、燃烧过程和航天高技术中的气体动力学问题。近几年国内各有关单位也开始重视这一领域的研究,特别是力学所已经在实验设备更新、科研队伍组织、理论和实验研究课题的开展等各方面均取得了良好的进展。已建立起高温激波管、化学激波管、激波风洞、超燃实验装置和爆轰驱动高焓激波风洞(97 年投入使用)等配套的实验设备。由高速空气动力学、物理力学和化学流体力学等分支学科的骨干队伍成立了统一的高温气体力学开放研究实验室,把理论研究、模拟实验和数值计算紧密地配合在一起。已在基本非平衡过程的实验研究、直接统计模拟方法(DSMC)、高温气体非平衡流的多温度模型等方面均取得良好的开端。

## 三、特点、研究内容及其前景:

高温气体动力学这一新兴交叉学科的特点是:

1. 由于气体分子的内部自由度处于激发状态,且分子间有化学反应存在,因此这种气体状态的描述不能象传统气体力学那样用若干简单的无量纲参数来概括,而必须从微观物理机制分析来解释气体的宏观参数和流动现象。

2. 由于流动的特征时间尺度与气体内态激发和化学反应驰豫的时间尺度可以相比,因此对于这种非平衡流动,必须把力学、物理和化学动力学的效应耦合起来加以考虑,才能够建立起符合实际的理论模型。

3. 由于实际工程问题是非常复杂的,很难单独用理论方法严格求解。尖端技术往往又要求极端的参数条件(高速、高温),也很难用单一的实验装置获得全面的模拟,必须把新概念的理论研究,新的模拟实验途径,最先进的参数诊断技术和新的数值计算方法紧密地配合起来才能取得成功。

针对未来不同重大工程的需求,有许多重要科学和技术问题急待我们去解决,例如:

1. 高温基本非平衡现象和过程的研究。分子振动激发松弛过程、解离松弛过程及其与非平衡辐射的关系,基元化学反应过程速率常数的测定,热非平衡和化学非平衡对输运性质的影响等。

2. 高焓、高超声速流中的真实气体效应。包括对纯空气典型流动条件下三维及底部和近尾流场中非平衡现象的观测,机理分析及流动状态对内态松弛、化学反应松弛、电离特性和光辐射特性的影响,真实气体效应对气动力、气动热的影响。有攻角时非对称转捩情况下滞流对非平衡流场特性的影响。当存在壁面烧蚀或尾喷流时对底部和近尾流场各种非平衡特性的影响及机理研究。相应复杂流动条件下的理论计算模型和数值方法研究。

3. 化学反应流的机理与流体力学效应研究,高温热解和化学反应的机理,流动状态与化学反应之间的耦合效应,特别关注毒物和废弃物高温安全处理问题所针对的体系及高温化工中可获得特殊产物的体系,进而取得对反应过程和产物、产率的有效控制。

4. 基本燃烧现象的研究。主要研究对象包括起燃、起爆、火焰传播与反应系统的稳定性等。这是一个多层次相关联的问题,包括在微观阶段原子与分子的稳定性和基本机制的研究;反应的传播过程,具体的传质与传热机制,涨落与统计特性;最后是宏观流体力学阶段,包括由流体力学效应引起的正向反馈与定常和不定常的发展。本问题的逆问题即淬灭过程也有连带关系。超音速燃烧中的湍流混合、点火和稳定性也是人们关注的问题。

5. 稀薄气体流:与内能松弛、化学反应、辐射过程相关的碰撞转变几率及用直接模拟统计方法来描述这些过程的理论模型研究。

## 6. 新型地面模拟实验设备和瞬态诊断技术的研究。

为了推动高温气体动力学向更深层次发展,国际上竞相建设新一代高焓(同时具有高驻室压力)流动实验设备,其中最引人注目的是用来强化激波风洞驱动能力的三种途径:一是以美国 CALSPAN 实验室为代表的加热高压氢驱动;二是以澳大利亚 Stalker 教授倡导的自由活塞驱动;三是我国俞鸿儒院士提出的氢氧爆轰驱动。同时也必须大力发展更先进的用于流速、温度、组元浓度、内态分布、湍流脉动等测

量的高分辨率瞬态技术,例如:激光多普勒测速、激光拉曼散射、激光诱导荧光、电子束诱导荧光、红外成像等。

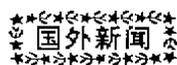
可以预测未来十年有可能在上述这些课题中取得一些突破性进展。长远说来本领域的研究成果将为发展我国先进的高温化工、高效、低污染燃烧技术和新一代航空、航天飞行器提供坚实的不可缺少的科学理论和技术基础,并对这些重要工程技术的发展起到巨大的推动作用。

## Dynamics of High-Temperature Gas and Its Prospects

Director and Research Professor of Open Laboratory of Dynamics of  
High Temperature Gas, CAS Zhu Naiyi  
(Institute of Mechanics of CAS, Beijing 100080)

**Abstract** Dynamics of high-temperature gas is one of nascent and the most vibrant branches of modern dynamics. The paper describes the developmental background, characteristics and the present domestic and external status of the discipline and presents its prospects as well.

(责任编辑:许蓉)



## 法国内务部长谈法国 1997 年的科学发展与改革

据法国《研究》杂志近期报道,法国内务部长法朗索瓦·德贝特前不久对该刊记者就有关法国 1997 年的科学政策问题发表了谈话,其要点如下:

●法国公共研究机构为了发展科研工作将于 1997 年增加招聘研究人员 7.5%,其中大部分将是年青人。如全国科学研究中心(CNRS)就将招聘 285 名研究人员和 298 名工程技术与管理人,而 1996 年只分别招聘了 261 和 231 名人员。

●为了控制预算和促进人员流动,将鼓励提前退休。按目前规定,主任研究员可工作到 68 岁退休,现在跨部研究委员会已提出把这一时间提前到 65 岁。另外,有关机构可能会制定出一些财政鼓励措施,鼓励研究人员在 60~65 之间退休。但退休主任研究员如果希望的话,可享受荣誉退休制度的有关规定,继续领导研究工作。

●将促进研究机构和大学之间的双向人员流动,一方面研究机构将接受客座教师—研究员,特别是愿意从事几年研究工作的青年讲师;另一方面,希望以实验经验丰富的人员来完善其实验室结构的大学可接受研究人员或主任研究员,流动范围将不是很大,只希望 80 所法国大学中平均每年每所大学流动 3 个职位。但政府给研究机构和大学所提供的有关财政手段有可能加速这一过程。

●为促进公共研究机构和企业部门之间的联系与合作,主要措施是通过建立“技术与研究基金”(FRT)优惠提供鼓励性信贷,该基金的宗旨就是资助公共研究机构和企业部门开展合作研究。另一方面,促进合作研究也是旨在鼓励研究人员流动——这次是向工业部门流动。目前在奥尔赛—萨克雷(Orsay-Saclay)地区已形成一个高度智力密集区,其密集程度大概比美国的硅谷还要高,但可惜的是这一研究极地周围的辐射企业并不多。但研究表明,和目前的一种看法相反,参与合作研究项目的公共机构研究人员所发表的论文并不比一般研究人员少,而参与合作项目的工业研究人员所获专利却高一倍,因此今年我们将保持对 FRT 的支付信贷承诺,并计划于 1997 年加以提高,使该项目的预算拨款授权额达到 4.9 亿法郎及其支付信贷达到 7.9 亿法郎。

●清除妨碍研究人员创办企业的障碍,为此要制定有关规章制度,允许研究人员出去创办公司并避免因此引起的批评和利益矛盾。我们目前正在和司法部磋商,以使公职研究人员可同时兼任企业股东或顾问。在美国,这类规章制度是以宪章形式张贴在每所大学里,法国也需将这种制度写成法令。我坚信科学界蕴藏着企业的创造人才矿床。而为了支持这些创造性人才的研究工作就必须促进风险投资,因此我希望对于革新企业的投资者应给予重大税收优惠。(索民)