从会议的大部分重要报告可以看出，由于新的研究方法和技术的出现或引入，相关研究内容在不断扩大和深化，并着重在后者．我们应重视方法和技术的研究及其投入，以便能真正做到知识创新．个别报告还涉及纳米生物技术内容．另外，从开幕式上介绍的各国微重力科学发展计划可以看出，相比而言，国外(特别是美国和日本) 都有长期的和较落实的研究计划．其原因和特点是受到长期较稳定的经费支持．二是能紧密与其他相关学科发展或社会需求相结合，例如与目前兴起的生物医学等研究相配合．这样才能具有更强的生命力．

2.4 实验技术

此次会议有两次实验技术分会，主要涉及实验装置的模块化设计、标准化设计、空间科学试验及装置的商业化运作、遥科学技术与自动化技术的有机结合及图像信息获取与处理技术等．虽然不同的空间试验需要不同的硬件设计，但通过模块化设计可以使不同的硬件模块具备单一的，可以完成特殊试验需求的功能模块．国际商业公司积极参与空间科学试验及装置的设计和制造，并为科学研究部门提供空间飞行的机会，从中创造新的商业机遇．对硬件进行优化设计，充分考虑机器人操作和遥控遥测的可行性，使实验装置的自主运行为主，并可进行遥操作，使空间实验受地面干预的可能性及实施性得到增强．图像信息由二维发展，并已开始应用于晶体生长中观测微粒的三维运动．显微立体图像获取技术也正在开展．我国应在国内已开展的空间微重力实验技术现有的基础上，优化设计实验结构及装置，减少重复投入，提高产出效率，并探讨进行商业运作的可能性以扩大响应．

2.5 基础物理

基础物理分会的口头报告分 7 个单元，共计 34 个报告，所涉及的研究方向分别是：低温非平衡态、低温现象、低温微重力物理相关课题、低温和引力物理、引力与相对论物理、原子物理相关课题、激光冷却及其他课题．显然，低温环境下的基础物理研究工作占了极大的比重，由于低温条件下的信噪比远高于常温情况，这类研究工作的特点就是精度较高．在这方面，我国几乎放弃了低温环境，这是值得领导关注的问题．会议代表对基础物理研究报告表示出了很大的兴趣，7 个单元的报告会每次都坐满了听众并进行了热烈的讨论．会议组织者将我们的三位代表分别安排为前三次分会的主席．

3 会间交流

会议期间，中、美、日三国代表对本届学术会议交换了意见，并对下届会议进行了讨论．三方同意继续将环太平洋微重力学术会议进行下去，并决定第三届会议将在中国举行．美国空间局代表表示，它们将支持空间局项目的责任科学家 (PI) 届时到中国参加第三届会议．

会议前后中国代表团还分 4 个学科组分别对美国的 15 余所大学和非政府单位进行了学术访问和较深入的学术交流，取得了较好的结果．

高超声速吸气式发动机的研究进展与发展趋势

张新宇

中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室，北京 100080

1 前 言

高超声速吸气式推进技术是发展新一代低成本、高性能天地往返运输系统的关键技术，具有强烈的航空航天和军事应用背景，因此它是当前国际上航空航天大国竞相投入巨资开展研究工作的重点之一，其核心是超燃冲压发动机．今年 6 月初美国 NASA 试飞的 X-43A 样机基本上可以代表目前国际上发展此项技术的最前沿．虽然由于搭载火箭的失败，没有获得有效的实验数据，但这次试飞说明大量的关键性技术问题已经解决，已由地面实验转移到飞行实验阶段．

我国在这方面的研究工作起步较晚，1999 年才正式开始论证如何发展我国的高超声速技术．经过两年的分析与考察，研究工作已比较系统性地提到日程上来．

2 当前的研究动态

2001 年 4 月 22 日 ~27 日在日本京都市召开了第 10 届国际空天飞机与高超声速系统及技术会议 (10th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference)．作者在国家自然科学基金委的资助下参加了这次会议．会议是由美国宇航学会 (AIAA) 与日本国家航空技术研究所 (NAL)、日本宇宙开发事业团 (NASDA)、日本宇宙研究所 (ISAS) 联合主办的．会议的目的是提供一个讨论、交流高超声速技术及相关领域研究成果的场所，使研究人员了解高超声速技术在不同层次上的最新进展情况．这次会议把吸气式推进与材料设为两个重点方向．

这次会议共有 9 个大会报告，具体内容如下：

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1. Future Launcher Perspectives at ESA, Caponricci M., France.

2. German Perspectives for Future Launchers, Kuczera H., Germany.

3. Next Generations Space Transportation Systems: R&D and Need for Flying Test Beds, Russo G., Italy.

4. Austrian Contributions to Space Plane and Hypersonic Systems Activities, Balogh W., Austria.

5. Overview on French Activities on Hypersonic Airbreathing Propulsion, Falempin F., France.

6. NASA Hypersonic Research Activities, McClinton C., United States.

7. USAF HySET Overview, Mercier R., United States.

8. Current Status of Russian "Oryol" Program, Anfimov N., Rassia.

9. Japanese Spaceplane/RLV Programme, Maita M., Japan.

其中美国、法国各占两篇，德国、意大利、澳大利亚、俄罗斯和日本各一篇. 这也基本上反映了当前在高超声速技术领域的贡献和各国在国际上所处的地位.

分会报告涉及的领域有：

- 空气动力学及其数值计算,
- 地面实验与设备,
- 推进系统 (概念、进气道、燃烧室、尾喷管) 及其数值计算,
- 材料与结构设计,
- 系统与飞行器概念,
- 飞行实验,
- 制导与控制,
- 技术发展.

与会者共有 250~300 人，主要来自世界上的几个航空航天大国：日本、美国、法国、德国、俄罗斯，估计占去了 90% 左右. 其余的有意大利、英国、荷兰、澳大利亚、瑞典、韩国和土尔其等. 我国只有作者一人参加 (另外还有几位在日本的中国留学生).

自年初以来，美国《航空周刊》上连续刊登了几篇有关超燃冲压发动机研究及发展的报告 [1~5]，加上 NASA 对 6 月份试飞 X-43 的大力宣传，本次会议一开始，吸气式推进系统就成为一个热点话题. 大会报告 (6) 利用大量图片，把美国以 NASA 为中心的研发工作的历史、现状和未来的发展，特别是 X-43A 的最新进展作了详细的介绍. 大会报告 (7) 介绍了美国空军正在执行的 HySET (Hydrocarbon Scramjet Engine Technology) 计划，其主攻目标是研究马赫数 4~8 的碳氢燃料巡航导弹. 该报告称他们已通过 "Barbotage" 技术解决了马赫数 8 以下 JP7 航空煤油的超燃问题，但具体技术细节以及最新进展情况未作详细介绍.

美国 NASA 兰利中心的特别报告，再一次突出了美国的技术储备和研究实力 [6]. 但其它国家的工作也很引人注目. 在飞行实验方面，法国与俄罗斯经过多年的合作，已建立起了一套包括运载器 (飞机、火箭)、超燃冲压发动机实验模型，以及分离、回收技术在内的系统，并已成功地获得了马赫数 6 以上正推力 [7]. 这方面的成果并不在美国之下.

在地面实验方面，这次美国 NASA 兰利中心的 X-43 在 8 英尺高焓风洞的实验报告、美国空军 AEDC 提出利用电磁流体技术大大提高传统实验设备性能的报告、 Pratt & Whitney 的 RBCC 一体化系统实验的报告、 GASL 的 Hyper-X 马赫 10 发动机的实验报告等显示了美国以其充实的实验设备和多年的经验积累，在研究工作的广度与深度上的实力 [8~11]. 与美国的大范围的研究内容相比，法国与日本则有所侧重，显示了研究工作的深度和精细性. 比如法国 ONERA 与德国 DLR 合作进行的 PIV 超燃流场测速研究、 ONERA 的 PLIF 与 CARS 技术测量超声速化学反应层中氢氧基浓度的报告等，给人留下了深刻的印象 [12,13]. 另外法国的几篇与德国、日本、俄罗斯合作的报告也很引人注目 [14~16]. 由于日本是会议的东道主，所以日本报告的数量最多. 这也说明了高超声速技术在日本受到重视的程度 [17~20]. 但主要研究工作在日本国家航空技术实验室 (NAL) 进行. 日本的研究工作是 80 年代中期开始起步，与我国 863 基本同期. 经过几年的调研论证， 1994 年建起了超燃冲压发动机实验台 (RJTF)，用于马赫数 4 、 6 、 8 的实验 [21]. 在马赫数 6 实验条件下可进行蓄热加热与燃烧加热的比较. 1998 年又建造了亚洲最大的高焓激波风洞，与 RJTF 相互配合，以马赫数 8 为搭接点，从不同侧面开展超燃冲压发动机模型实验研究.

3 我们的研究现状

自 1994 年起，中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室在 863 航天高技术计划和国家自然科学重点基金的支持下，开始从事超 / 高超声速推进系统关键问题的基础研究工作，并建成了全国第一台直连式超声速燃烧实验设备，它可向燃烧室提供飞行速度最高为 7 倍声速的高焓气流 (总温 2 100 K 、总压 4 MPa 、流量 2.0 kg/s). 使用该设备，已在氢气自点火极限、氢 / 空气支杆排架混合和燃烧、碳氢燃料的雾化 / 超声速燃烧以及增强混合、稳定燃烧等方面获得了大量成果 [22~28]. 因此这个设备是研究超燃冲压发动机关键部件 —— 燃烧室的一个非常有力的工具. 在这个直连式超燃实验台的基础上，自 1999 年起，在中国科学院的支持下，我们已完成了可进行超燃冲压发动机模型整体实验的高超声速推进实验装置的建造，把燃烧室研究工作进一步发展到发动机整体研究，拓宽研究范围. 一般在高超声速推进系统的实

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

验研究中，直连式与自由射流式是两类必要的设备，缺一不可.

在这次会议上，作者介绍该实验装置、性能参数和设备调试的初步结果 [29]. 由于这是我国与会的唯一报告，也是我国在国际学术会议上第一次介绍高焓自由射流式超燃冲压发动机实验台的报告，所以引起了各国同行的注意. 美国 NASA 兰利中心的两名研究人员特地从其它会场赶来，对我们的工作给予了充分的肯定，一起探讨了一些技术细节问题，并提出了他们的建议.

4 分析与建议

这次会议感受最深的是我们与世界的差距. 美国在高超声速技术研究方面已有四、五十年的历史，仅在本次会议报告 (AIAA-2001-1927) 中提到的高焓自由射流实验装置就有 21 座，超燃冲压发动机模型近 50 种 [6]. 涉及的部门也很广泛，包括 NASA 的 Langley、Lewis、Ames 等研究中心，空军的 AEDC, GASL、Calspan、Marquardt、Pratt & Whitney 等大公司以及一批高等院校. 而我国可以说是刚刚起步，甚至是有待起步. 目前参与的单位不多，缺乏系统性的研究规划和研究条件.

从这次会议的报告中不难看出，各国在普遍开展基础研究的同时，存在一个政府或接近政府级的核心单位为主，带动、引导整体的研究. 美国军用方面空军、海军、国防部都有各自的研究计划的研究系统，民用方面 NASA 起牵头作用. 法国的 ONERA，德国的 DLR，日本的 NAL 等都是在政府的直接参与或支持下发展应用研究，同时起一个桥梁的作用，支持相关基础研究的开展. 在这次会议上，几个航空航天大国都介绍了各自的发展规划. 美国的规划最多，而且经常改变. 比如 NASP 的下马、X-33 的终止可以说出人意料. 这也正说明了制定规划的重要性和研究工作本身的复杂性.

参 考 文 献

1 X-43 readied for captive carry test. Aviation Week & Space Technology, 2001, Feb.5: 20

2 Smith B A. X-43 Scramjet, booster testing leading to first flight by June. *Aviation Week & Space Technology*, 2001, Feb.12: 60~61

3 Kandebo S W. Landmark tests boost Scramjet's future. *Aviation Week & Space Technology*, 2001, March 26: 58~59

4 Kandebo S W. Testing key to Scramjet success. *Aviation Week & Space Technology*, 2001, March 26: 60~61

5 Kandebo S W. France, Russia to join in Scramjet flight tests. *Aviation Week & Space Technology*, 2001, Apr.23: 47

6 Andrews E H. Scramjet Development and Testing in the United States. AIAA-2001-1927, 2001

7 Falempin F. Overview on French activities on hypersonic airbreathing propulsion. In: 10th International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Plenary Report, 2001

8 Huebner L, Rock K, Ruf E, Witte D, Andrews E. Hyper-X Flight Engine Ground Testing for X-43 Flight Risk Reduction. AIAA-2001-1809, 2001

9 Fetterhoff T, Jordan J. RDHWT/MARIAH II Wind Tunnel Research Program Update. AIAA-2001-1859, 2001

10 Faulkner R. Integrated System Test of an Airbreathing Rocket (ISTAR). AIAA-2001-1812, 2001

11 Bakos R. Hyper-X Mach 10 Engine Flowpath Development: Review of Fifth Entry Tests in HYPULSE. AIAA-2001-1814, 2001

12 Weisgerber H, Martinuzzi R, Brummund U, Magre P. PIV Measurements in a Mach 2 Hydrogen-Air Supersonic Combustion. AIAA-2001-1757, 2001

13 Bresson A, Bouchardy P, Magre P, Grisch F. OH/Acetone PLIF and CARS Thermometry in a Supersonic Reactive Layer. AIAA-2001-1759, 2001

14 Novelli P, Koschel W. Progress of the JAPHAR Cooperation between ONERA and DLR on Hypersonic Airbreathing Propulsion. AIAA-2001-1870, 2001

15 Yanagihara M, etc. Hope-X High Speed Flight Demostration Program Phase II. AIAA-2001-1805, 2001

16 Bouchez M, Falempin F, Levine V, Avrashkov V, Davidenko D. Franch-Russian Partnership on Hypersonic Wide Range Ramjet: Status in 2001. AIAA-2001-1872, 2001

17 Kanda T, Chinzei N, Kudo K, Murakami A. Dual-Mode Operation in a Scramjet Combustor. AIAA-2001-1816, 2001

18 Mitani T, Kobayashi K, Hiraiwa T, Tomioka S, Masuya G. Evaluation of Internal Aerodynamic Performance in Scramjet Engines. AIAA-2001-1885, 2001

19 Mashio S, Kurashina K, Bamba T, Okimoto S, Kaji S. Unstart Phenomenon due to Thermal Choke in Scramjet Module. AIAA-2001-1887, 2001

20 Kobayashi K, Tomioka S, Mitani T. Ignition by an H_2/O_2 Microburner in a Supersonic Airflow. AIAA-2002-1763

21 RJTF Construction Group. Ramjet Engine Test Facility. NAL TR-1347, 1998

22 Yu G, Li J, Zhao J, Yang S, Li C. Experimental Studies on H_2/Air Supersonic Combustion. AIAA-96-4512. 1996

23 Li J, Yu G, Zhang Y, Li Y, Qian D. Experimental studies on self-ignition of hydrogen/air supersonic combustion. *Journal of Propulsion and Power*, 1997, 13(4): 538~542

24 Sung C, Li J, Yu G, Law C K. Influence of Chemical Kinetics in the Self-Ignition of Nonpremixed Supersonic Hydrogen-Air Flow. AIAA-98-0722, 1998

25 Yu G, etc. Hydrogen-Air Supersonic Combustion Study by Strut Injectors. AIAA-98-3275. 1998

26 Li J, Yu G, Zhang X, Huang Q. Combustion of Kerosene in a Supersonic Stream. AIAA-2000-0615. 2000

27 Yu G, Li J, Zhang X, Chen L. Investigation on Combustion Characteristics of Kerosene-Hydrogen Dual Fuel in a Supersonic Combustor. AIAA-2000-3620, 2000

28 Yu G, Li J, X. Chang, Chen L, Sung C J. Investigation of Fuel Injection and Flame Stabilization in Liquid Hydrocarbon-Fueled Supersonic Combustors. AIAA-2001-3608, 2001

29 Chang X, Chen L, Yu G, Qian D. Development of a Facility for Model Scramjet Testing. AIAA-2001-1857, 2001

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net