

建设国家重点实验室、支撑空天科技发展

姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室(筹), 北京海淀区 100190)

1 前言

高温气体动力学国家重点实验室(筹)(State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, LHD)以空天科技发展为主要背景,致力于高温气体动力学的基础学科研究,以支撑我国高超声速技术发展的需求。LHD是在二十世纪五十年代末钱学森和郭永怀先生建立的力学所气动科研力量和学科方向的基础上发展壮大,作为中国科学院重点实验室正式成立于1994年。十几年来,在俞鸿儒院士的指导下,LHD以创新求发展,逐步建设成为理论、实验和数值模拟研究相结合、装备配套的高温气体动力学开放研究基地。1998、2004、2005年度,LHD先后多次以优异成绩通过中科院或国家重点实验室评估。特别是2009年度的中科院重点实验室评估中,在20个数理领域的重点实验室中取得了排名第一的优秀成绩。

建设高温气体动力学国家重点实验室一直是LHD多年的奋斗目标,在所领导和主管部门的高度重视和支持下,2010年10月29日LHD正式启动了国家重点实验室申请与筹备工作。2011年1月26日上午,由中国科学技术部基础研究司组织的专家组对LHD进行了国家重点实验室申请现场评估。2011年1月27日下午,评估专家组听取了实验室主任的国家重点实验室申请报告。2011年3月27日科技部正式批准了LHD的建设申请报告。2011年5月10日,实验室向科技部报送了国家重点实验室建设计划任务书。2011年6月21日通过了科技部组织的实验室建设计划可行性论证答辩,LHD进入了国家重点实验室的建设实施阶段。

2 实验室主要研究方向

高温气体动力学国家重点实验室(筹)将继续坚持钱学森先生倡导的科研理念,遵照中国科学院开展基础性、前瞻性和战略性研究的办院方针,面向国家航空航天和国民经济的重大战略需求,以突破高超声速科技的关键技术为主要目标,研究在高温高超声速极端条件下,具有分子振动和转动激发、分子离解、电离等内态变化介质的复杂流动规律;建立、完善高温气体动力学理论体系,支撑高超声速科技关键技术的突破;建设具有国际水平和持续创新能力的高温气体动力学科研与人才培养基地。

高温气体动力学国家重点实验室(筹)以开展高温气体流动的前瞻性、基础性和战略性研究为理念,以支撑高超声速关键技术攻关为目标、以实现实验室科研目标从关键技术研究到关键技术集成研究的提升为宗旨,进一步强化实验室的科研团队,布局高温气体动力学国家重点实验室(筹)五个相互支撑的主要研究方向(如图1所示)。

1) **高焓热化学反应流动:** 高温气体介质微团形态的物理化学变化,通过热力学、热传导、热辐射、气动光学等过程显著地改变了高温气体宏观流动规律,也改变了高超声速飞行器的气动力/热特性,是高超声速飞行器设计必须解决的关键问题。在该研究方向,实验室重点研究:先进的高温气体流动模拟试验技术;高温反应气体流动机理;激波支配的高超声速流动;高超声速飞行器气动力/热规律;高超声速飞行器热防护技术。

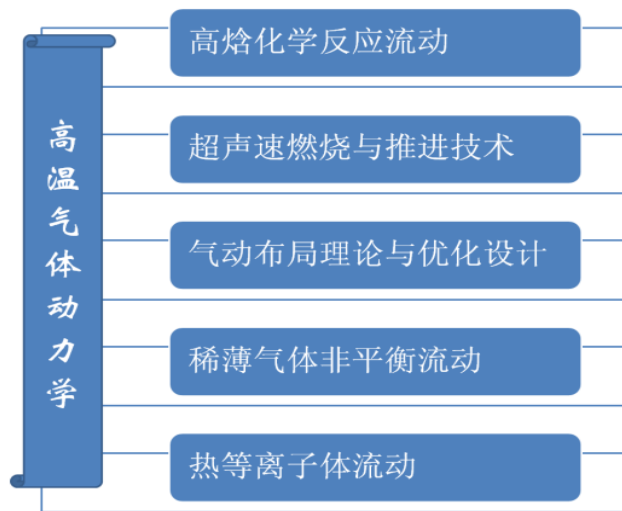


图1 高温气体动力学国家重点实验室(筹)主要研究方向布局

2) **超声速燃烧与推进技术**: 高超声速飞行发展的一个主要关键问题是吸气式推进技术, 其很重要的一个研究方向是超燃冲压发动机。构成该发动机的主要部件是进气道、燃烧室和尾喷管, 研究其性能以及部件之间的匹配机理和相互作用规律, 能够提高发动机的整体性能。同时还需开展热防护研究, 保证轻质(满足飞行重量)发动机在恶劣热环境下长时间正常工作。实验室重点研究: 不同物态碳氢燃料组织燃烧与推力特性; 气/固/液耦合传热机理与发动机主动热防护; 发动机轻量化结构设计方法。

3) **气动构型理论与优化设计**: 气动构型设计是高超声速飞行器研制的关键技术之一。通过发展气动布局理论和优化设计方法, 开展一体化设计, 提升飞行器整体气动性能, 是飞行器工程设计思想的重大变革, 也是国际发展趋势。实验室重点研究: 鲁棒高效的优化设计方法; 优化气动构型的流动机理与几何参数关联规律; 普适的气动构型优化方法。

4) **稀薄气体非平衡流动**: 高超声速飞行器在 60km 以上高空飞行时, 气体流态已经属于稀薄气体流动范畴, 具有高温的分子内态非平衡、高速流动结构非平衡等特点。实验室重点研究: 高效稀薄气体数值模拟与地面实验技术; 稀薄气体效应及其影响规律; 飞行器稀薄环境下的气动性能和喷流控制规律。

5) **热等离子体流动**: 高超声速飞行器的飞行过程中, 空气的高温离解和部分电离将在飞行器的周围形成一个等离子体层。研究等离子体的形成、流动、传热、传质等规律, 是研究飞行器光/电/热/力特性的基础。该研究方向的主要研究内容包括三个方面: 热等离子体的产生与流动状态控制; 热等离子体射流参数诊断; 热等离子体应用技术与高超声速气动烧蚀和热烧蚀实验研究。

3 建设期间的重点研究项目

高温气体动力学重点实验室(筹)在建设期内除了继续开展在高焓热化学反应流动、超声速燃烧与推进技术、气动构型理论与优化设计、稀薄气体非平衡流动、热等离子体流动等五个方面基础研究的同时, 根据国家需求和实验室的发展规划, LHD 将重点完成复现高超声速风飞行条件激波风洞调试与测量系统研制, 开展突破主动冷却发动机关键技术研究的突破。

1) **JF12 高超声速激波风洞建设及高温气动问题研究**: 实验室目前建设的 JF12 长实验时间高超声速激波风洞的装备总长 265m, 试验段直径 3.5m, 喷管出口直径 2.5m, 具有复现马赫数 5~9 飞行条件的能力, 已经成为能够支撑国家重大科技专项高端实验的唯一设备, 也成为实验室深入开展高温气体流动实验的主要

装备。JF12 激波风洞的设备安装目前已经顺利完成，正在进行运行调试。在国家实验室建设期间，完成 JF12 激波风洞建设，并开展相关气动问题研究是实验室的重点项目之一。建设计划主要完成两个方面的科研工作：一个是 JF12 激波风洞调试与先进测量技术发展；另一个是应用 JF12 开展超声速燃烧基础研究。建设的目的在于形成具有科研实验能力的实验平台，并应用平台探索地面模拟实验与飞行状态的差别来的高温气体方面的问题，澄清困扰高超声速推进技术研究多年的难题，支撑高超声速技术和国家重大专项的发展。

2) 主动冷却发动机研制及超声速推进技术：主动冷却发动机研究的核心是在保证发动机燃烧与推力性能的前提下，把应用燃料的冷却过程与燃烧过程高度耦合起来。该项目属于高超声速技术发展的主要难题之一，科研难度很大，极富挑战性。LHD 已经突破了 Ma6 飞行条件下矩形燃烧室主动冷却的主要关键技术。即在马赫数 2.5、来流总温 1500-1900K、总压 1.1-1.5MPa、燃烧用油当量比 1.0，冷却用油当量比 1.8-2.4 等条件下，主动冷却燃烧室分别顺利通过了 10s、20s、30s、60s、120s、200s、256s 等多次燃烧试验考核。通过这些试验，摸清了主动冷却过程燃料温度、压力、流量等演化规律，根据这些规律，发展了燃料流量分配与控制技术。试验结果表明，燃烧约 60-80s 后，冷却系统出口油温与燃烧室结构温度达到热平衡。建设期间，LHD 将重点开展以下四个方面的基础研究：超声速燃烧机理与发动机推力性能优化研究；发动机热环境研究；气/固/液耦合传热机理与主动冷却技术研究；发动机起动过程与亚燃/超燃模态转换技术。

4 科研团队建设与培育

依据国家重点实验室的平台，根据十六年来实验室团队建设的经验，实验室将结合国家重大需求和高温气体动力学学科发展，加大对优秀人才的吸引和培养力度，形成稳定的科研团队建设制度：

1) 结合中国科学院的百人计划，实施“将才”培养计划：充分利用中国科学院“百人

计划”引进政策，加大相关人才培养的支持力度，推行实验室“将才计划”。实验室将从国内外遴选多名优秀青年人才作为“将才”计划培养人员，配合“百人计划”，匹配适当的科研经费，并通过支持承担和参与国家、中科院、地方和国际合作等重要科技项目的形式对他们进行重点培养，形成优秀的科学家研究团队，培养造就实验室将来的领军人才。

2) 提高青年创新基金支持力度，造就青年科技人才：实验室将进一步增加青年创新基金的支持力度，为年轻的科研人员提供科研经费支持，鼓励青年人重视基础研究，参与国家重大项目与国际合作，在科研实践中提升科研水平与攻克重大科技难题的能力。

3) 加强技术支撑人才的培养，提升实验平台的运行效率：结合实验室科研平台与测量技术的建设与发展，实验室将提供一定的专项经费，加强技术支撑人才的培养与引进，构建以科研保障程度与服务水平为主要标准的评价体系激励机制，为科研一线提供实验研究的高效平台和技术保障。

4) 设立国际合作基金，拓宽学术交流范畴：实验室将设立国际交流合作基金，支持实验室的科技人员、特别是青年科技人员参加国际学术交流与国际合作。通过这种学术交流，拓宽他们的科研领域、学术水平与科研能力。

5) 提高对外开放课题的支持力度，强化高水平的合作研究：作为中国科学院重点实验室，多年来执行的对外开放课题研究计划充分发挥实验室科研平台作用，在推动我国的高温气体动力学研究发展，提升实验室科研水平方面发挥了重要作用。实验室将近一步提高对外开放课题的支持力度，鼓励国内外杰出人才利用实验室先进的实验平台，与实验室的相关科研团队开展合作研究，提升我国高温气动杰出研究水平。

5 实验室科研能力建设

实验室目前正在建设能够复现高超声速飞行条件的激波风洞，这是财政部支持的国家重大创新装备研制项目，装备研制目的是为国家

重大专项提供高端实验装备。该风洞技术集实验室数十年的科研成果，是目前国际上尺度最大，高温气体流动模拟能力最强、技术水平最高的高超声速激波风洞。科研团队将在国家重点实验室的支持下，加大装备调试和实验测量技术配套的力度，争取在五年内为国家重大专项作出具有基础性、创新性、支撑性的科研成果。该装备投资 4600 万元。为配套该大型设备，建设期间，实验室将购置 256 通道测热测压数据采集系统，研制 JF12 长实验时间高超声速激波风洞气动力测量系统与校正平台。通过测量系统的配套，形成应用 JF12 开展气动实验的能力。

实验室正在启动国家重大专项的条件保障项目，建设高超声速推进技术基础研究实验平台。该平台包括超燃冲压发动机自由射流风洞系统、发动机热结构测试系统、燃料性能测试系统和激光光谱诊断系统等。为了完善条件保障项目，实验室将研制可调谐激光吸收光谱高温气体流动参数诊断系统。通过这种先进测量技术的研制，充分发挥高超声速推进技术实验平台的作用。建设期间，实验室添置与研制仪器设备如下：

1) 256 通道测热测压数据采集系统：

数据采集系统主要为实验室高温气动平台的测压和测热试验服务，应能够满足实验室激波风洞开展风洞试验及其他课题试验研究对测试系统提出的高精度、大容量的测试要求，同时也满足高可靠性和抗强干扰的要求。本数据采集系统的硬件包括信号适调器、瞬态记录仪，适用于压阻传感器、热电偶信号的调理、放大、采集及处理，并为相应传感器提供电源。配合网络版软件组成多通道大容量数据采集系统，用于对各种测压，测热和测速高速动态信号的采集、存储、分析和处理。

2) JF12 激波风洞气动力测量系统与校正平台：

该气动力测量系统主要为实验室高温气动平台的飞行器气动力测量试验服务，能够满足应用激波风洞进行不同尺度飞行器模型的测力试验及其他课题试验研究对气动力测试系统的要求。JF12 气动力测量系统主要包括：量程不

同的系列测力天平（飞行器模型长度：250mm - 4000mm）；天平信号的调理、放大、采集及处理系统；相应的传感器电源；高速动态信号的采集、存储、分析和处理系统；气动力天平的调试与校正平台。

3) 可调谐激光吸收光谱高温气体流动参数诊断系统：

该诊断系统应用于超燃冲压发动机燃烧室内的高温反应流动的特征与能量释放规律研究；满足实验室高焓激波风洞的高频响、非接触与实时在线的组分与温度测量。计划建立的多通道吸收光谱诊断系统由五部分组成：分别是激光器以及控制部分（控制器、调谐电路）、传输部分（光纤、准直器）和接收探测单元、波长标定装置和同步控制系统；波长标定装置包括波长计和干涉仪，波长计主要用于精确确定波长，干涉仪主要用于确定激光器的调谐范围；同步控制系统主要用来触发诊断系统，确保采集到的数据处在设备实验的时间段内。

4) JF8A 高超声速激波风洞的改进与传感器研制平台建设：

改进项目能够扩展 JF8A 激波风洞马赫数范围为 4—15，并延长有效实验时间；改进的实验段能够进一步提高 JF8A 性能；建设压力传感器与热流传感器标定系统，能够为实验室的压力与热流测量提供标定服务。改进项目的系统构成：JF8A 被驱动段附加段及驱动段延长段；JF8A 实验段改进部件及大口径夹膜装置；全自动压力标定台；薄膜电阻温度计制作系统；全自动薄膜电阻温度计参数标定系统。

5) 超燃冲压发动机燃烧室综合实验平台：

该平台主要用于超燃冲压发动机燃烧室的燃烧性能和热结构实验研究，满足燃烧室达到热平衡所需要的运行时间要求，最大模拟飞行马赫数可达到 7。该平台主要包括用于产生相应飞行状态（总温、总压）的烧氢补氧加热系统、模拟燃烧室进口马赫数的超声速喷管、导出燃烧室燃气的排气系统、用于产生实验气流的高压气源系统、用于控制该平台运行和采集实验数据的控制与数据采集系统。

6 结束语

国家对空天科技发展需求极其迫切，高温气体动力学基础研究是其创新发展的源动力。六十年科研传承，LHD 实验室已经发展成为我国高温气动基础研究实力最强的团队，相关原创性成果在国际上占有一席之地；十六年实验室建设，作为中科院重点实验室管理规范，卓有成效；过去五年的努力，实验室在高超推进，先进热防护、气动布局理论与优化，高超声速模拟实验等四大关键技术方面获得了重大突破；两年的国家重点实验室建设，将进一步强化实验室团队建设力度，并提升科研条件水平。在未来的两年里，LHD 将全力以赴完成高温气体动力学国家重点实验室的建设，实现实验室多年来的奋斗目标，为推动我国新世纪空天科技的发展去努力工作，去艰苦奋斗。