



中国科学院高温气体动力学重点实验室研究进展

姜宗林[†]

中国科学院高温气体动力学重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190

中国科学院高温气体动力学重点实验室是在钱学森先生和郭永怀先生创立的科研队伍的基础上于 1994 年组建的. 实验室成立以来一直坚持钱学森先生倡导的“工程科学”理念, 面向国家安全和国民经济的重大战略需求, 主要研究高温、高超声速极端条件下, 具有分子振动与转动激发、解离、电离等内态变化介质的流动规律, 推动气体动力学科的创新与发展; 并通过发展新理论、新方法、新概念和新技术, 突破国家重大需求项目的关键技术, 为作出基础性、前瞻性和战略性的研究成果; 建设具有重要国际影响的高温气体动力学研究与人才培养基地. 实验室 2004 年和 2005 年先后以优异成绩通过中科院和国家重点实验室评估; 2006 年获得国家自然科学基金委创新群体; 2007 年获得中科院/国家外专局国际合作伙伴; 2009 年度中科院重点实验室评估排名第一. 近年来, 实验室以突破高超声速关键技术为目的, 在高焓高超声速气体流动、超超声速燃烧与爆轰物理、稀薄气体与非平衡流动、高超声速飞行器气动构型理论等主要研究方向取得了重要进展, 在支撑中国高超声速流动模拟实验技术、高超声速推进技术、气动热预测与防护技术、高超声速飞行器设计技术等重大关键技术的突破方面发挥了重要作用.

1 高焓高超声速气体流动规律

先进的高超声速流动模拟实验装备是高超声速研究的基础, 著名气动专家庄逢甘院士指出: “风洞性能在相当程度上决定研制型号的水平”. 实验室利用爆轰驱动技术, 研制出系列的高焓高超声速激波风洞, 覆盖了空天飞行器的飞行走廊, 并利用这些先进的高超声速装备, 深入开展高超声速流动气动/热方面的基础问题与关键技术研究, 取得了重要进展.

1.1 复现高超声速飞行条件激波风洞研制

为了满足高超声速研究领域里真实气体效应、尺度效应、气动光学效应和纯净空气的超超声速燃烧等等高端试验需求, 实验室提出了能够“复现”高超声速飞行条件的激波风洞新技术, 承担了国家重大创新装备研制项目. 在有效解决二次波效应、爆轰反射波影响、激波风洞缝合匹配参数和入射激波衰减等主要困难问题的基础上, 完成了新型激波风洞的设计与加工, 目前正在进行激波风洞的安装与调试. 新型激波风洞总长 265 m, 喷管直径 2.5 m, 驻室总温高达 3000 K、压力平台时间 30 ms~100 ms, 具有复现马赫数 5~10 的高超声速飞行

条件的能力.

1.2 流场重构式高超声速飞行器减阻防热新技术研究

为了实现高超声速飞行器长时间飞行无烧蚀, 实验室提出了一种流场重构式高超声速飞行器一体化减阻防热新技术. 物理模型由飞行器钝头体和一个能侧向喷流的支杆组成. 物理过程是应用携带的冷却剂主动冷却飞行器头部, 冷却剂吸热汽化后在支杆头部侧向喷出. 支杆通过改变弓型激波为锥型激波实现了飞行器头部流场的重构, 达到降低波阻、改善热环境的目的; 汽化的冷却剂能够冷却支杆顶部, 并通过增加锥型激角避免有攻角飞行时在钝头体表面发生激波/激波相互作用. 近年来的计算与实验研究表明: 新技术使得飞行器头部的峰值压力降低 66%、气动热的最大热流降低 70%、并且在有攻角飞行条件下同样有效果. 虽然支杆顶部热流量很高, 但是受热面积小, 适当量的冷却剂即可实现长时间飞行无烧蚀. 这种热防护系统比被动热防护系统在体积和重量方面都远远小得多. 实验室已经成功地完成了新技术的可行性研究, 正在深入开展关键技术的集成化与工程化研究.

2 超超声速燃烧与爆轰物理

高超声速推进系统是超超声速飞行器研制的首要关键技术之一. 先进的高超声速推进系统已经成为目前国际上许多航空航天大国竞相开展研究的热点. 但由于高超声速流动和化学反应动力学过程耦合产生的非线性、多尺度流动的复杂性, 虽然经过五十多年的研究, 至今高超声速推进系统的研究仍处于实验室研究和飞行验证阶段.

2.1 超燃冲压发动机研究进展

实验室成功搭建了与模型发动机配套的直联式超燃实验台, 并发展了高频激励射流、小支板辅助射流、等离子体辅助点火、气动斜坡等一系列增强混合和稳定燃烧的新技术和新方法. 在进气道设计方面, 通过实验与数值计算研究揭示了由于激波/边界层干扰, 三面压缩进气道内存在边界层分离、溢流和三维涡结构等复杂流动现象, 尤其是唇口诱发的较大强度的斜激波引起了侧壁和顶面的边界层分离, 并在顶板附近形成大尺度的流向涡, 造成隔离段内存在明显的分层流动现象. 通过分析这些影响进气道性能的因素, 开展了三面压缩进气道的设计方法研究, 在进气道进口马赫数 5.05 条件下, 使得新设计的进气道出口通流马赫数约 2.5, 捕获率 85% 以

[†] E-mail: zljia@imech.ac.cn

上,总压恢复 45% 以上.在进气道、燃烧室分部件研究进展的基础上,设计了飞行马赫数 6、飞行高度 25 km,采用碳氢燃料主动冷却技术,流量 2 kg/s 的超燃冲压发动机.通过性能试验研究,在燃料当量比 ~ 1 时,获得推力增益 910 N,换算成比冲 620 s.

2.2 爆轰现象理论研究

激波及其诱导的气体解离和燃烧进程与宏观高速流动的强耦合构成了高温气体动力学学科的基础,是高温气体动力学的核心研究内容.热效率极高的爆轰过程是激波与化学反应的强相互作用,对于高超声速推进有着非常重要的应用价值.实验室提出了规则胞格爆轰传播与起爆的统一框架理论.该理论框架有一个物理机制(非线性波与化学反应相互作用机制 IWPCR),两个基础物理过程(热点与化学反应带加速)和三个关键物理状态(临界起爆状态、临界传播状态、临界胞格尺度)组成.应用这个理论成功地解释了爆轰波一维理论,计算模拟的一、二、三爆轰波,实验观测的胞格爆轰传播与起爆过程倚赖的物理机制和爆轰物理模型简化依据的主要物理过程.

2.3 超声速燃烧机理与过程控制

超燃冲压发动机研究的关键上是燃烧室内部燃烧过程的研究.在这个高速流动过程中,燃料的化学能在燃烧室中按照一定的规律释放,因此,实现超声速流动过程的控制是提高发动机性能的关键.由于加热管道流动总是推动超声速流动逼近跨声速状态,而跨声速状态下气流的吸热能力为零.实验室通过燃烧室设计、燃烧喷射位置分布优化,实现了热释放过程的控制.实验结果表明:通过燃烧过程控制,燃烧室可以产生部分推力;避免燃烧火焰温度过高,降低解离反应程度,保证更高燃烧反应效率;使得流场处于超声速流动状态,降低燃烧室热壅塞的风险.

3 高超声速飞行器气动布局理论研究

高超声速流动具有激波强、总温高、阻力大的特征,给飞行器设计带来了挑战.高超声速飞行器的设计由传统飞行器以翼面升力为主,过渡到高以压缩面升力为主,从而产生了升力体和乘波体的设计概念.升阻高、能够防热降阻的高超声速飞行器一体化设计具有非常重要的意义.

3.1 乘波体生成方法研究和软件开发

乘波体是高超声速飞行器产生升力的主要部分.传统的乘波体设计方法一般基于楔形体流场、圆锥体流场等简单流场.为拓展设计空间,基于 CFD 分析,实验室发展了一种基于任意流场生成乘波体的方法和设计软件 GCBWRG V1.0(软件登记号: 2009SR07444),可基于任意截面形状锥体或任意母线形状旋成体生成乘波体外形.在此基础上通过大量计算分析,在 Mach 6, 25 km 飞行条件下,获得了锥形基本几何体和相应生成乘波体气动、几何等性能间的初步规律.

3.2 飞行器气动外形高效优化方法研究和应用

针对基于 CFD 分析的复杂外形的飞行器气动优化设计问题,以提高效率为目标,发展了一种高效且具有大范围收敛特性的同伦方法.通过同伦映射,将优化设计的目标函数表达为其同伦形式,在优化过程中基于 Sigmoid 函数调整同伦参数,一方面控制每个优化迭代步的

外形修正量保证计算稳定地进行,同时又能获得较好的计算效率.此外,还发展了基于人工神经网络的飞行器构型优化设计方法.上述方法应用于乘波体、尾喷管优化设计等问题,获得了很好的效果.通过数值分析和风洞试验验证,所优化的乘波体最大升阻比为 5.95.突破了升阻比屏障.

3.3 高超声速乘波飞行器一体化构型设计方法研究

在乘波体设计和优化研究的基础上,针对以超燃冲压发动机为动力的高超声速飞行器的特点,提出了参数化全流面高超声速飞行器一体化构型设计方法.飞行器前体(乘波体)的定义基于发动机进气道型面,可保证前体和发动机的流场匹配.提出采用修正流面设计发动机外整流罩(发明专利申请号: 200910077354.5),可进一步改善飞行器的气动性能.数值分析和风洞试验结果表明,依据此方法设计的飞行器实例具有较好的容积率和气动性能.

4 稀薄气体与非平衡流动

近空间飞行器在高高空飞行时具有明显的稀薄气体效应,对飞行器气动性能预估带来很大困难.在高速稀薄气体流动领域,气体流动偏离平衡态分布,连续介质理论失效,动理学分析至关重要.但是动理学基本方程极其复杂,研究手段缺乏,流动的动理学研究相对连续介质流动研究呈现严重不足的状态.实验室应用动理学方法、在稀薄气体流动规律及其微观机理方面获得了重要进展.

4.1 高超声速飞行器的过渡流区气动特性研究

由于稀薄气体效应影响,高超声速飞行器在过渡区飞行时的气动性能相比低空飞行时有很大差别.实验室的研究表明:稀薄气体效应使得飞行器的阻力系数增大,升力系数略有下降,因而升阻比随飞行高度的增加而下降明显;同时壁面的热流率系数也有增加.研究还发现,通过增大翼宽或减小飞行器的厚度均可以提高三角翼外形的飞行器的升阻比,但是具有相同翼宽和横截面积的乘波器具有更好的气动性能.

4.2 稀薄气体流动机理研究

从分子运动论的角度,往往可以得到清晰的流动机理.实验室近期对由于热不稳定性引起的 Rayleigh-Bénard 对流、激波/接触间断的非定常演化、角点的奇性等进行了研究.研究发现:流动中的涨落关联在热不稳定性的起源和流动结构的形成中起着重要作用,同时热传导到热对流状态的转变存在一个孕育阶段;激波具有稳定结构而接触间断由于黏性的作用会逐渐耗散;几何角点处的流动具有双值或多值特点,所以以单值处理时表现为奇性.研究结果对发展动理学的计算方法有实际意义,而 Rayleigh-Bénard 对流是非线性系统研究的一个标准模型.

4.3 稀薄环境下的多功能薄膜研制

高质量的多功能薄膜的制备一般要求制备环境的精确控制.实验室通过成功研制的国内首台 3 枪多源电子束物理气相沉积系统(IMCAS-MEBPVD),结合 DSMC 方法的微观统计模拟,优化 3 个蒸发源形成的蒸气粒子的数密度和能量分布,最终成功制备厚度和摩尔组分分布均匀的 YBa₂Cu₃O_{7-x} (简称 YBCO) 超导前驱薄膜,该前驱膜经过高温退火后可得到性能优异的

超导薄膜, 主要技术指标已接近国际先进水平. 如: 临界转变温度 T_c 为 91.5 K, 转变宽度小于 0.2 K; 小尺寸铝酸镧基体 (15 mm×10 mm) 上生长的 YBCO 薄膜临界

电流密度 J_c 可达 5.8 MA/cm^2 , (77 K, 0 T); 3 英寸大基片薄膜临界电流密度 J_c 可达 2.5 MA/cm^2 , (77 K, 0 T).

“2009 年全国压电和声波理论及器件技术研讨会暨 2009 年全国频率控制技术年会” 纪要

胡元太

华中科技大学

2009 年 12 月 17 日至 20 日, 由中国力学学会、中国声学学会、中国宇航学会计量与测试专业委员会、中国电子元件行业协会压电晶体分会和 IEEE 等主办, 由华中科技大学和中国航天科工集团第二研究院 203 所承办的“2009 年全国压电和声波理论及器件技术研讨会暨 2009 年全国频率控制技术年会 (SPAWDA09)” 在湖北武汉举行, 共有来自 5 个国家和地区、40 多个高校和科研院所及企业的 212 名代表参加了本届学术会议。

12 月 18 日上午举行了开幕式, 中国科学院姚熹院士、杨卫院士和郑晓静院士、中国力学学会副理事长方岱宁教授、中国电子元件行业协会压电晶体分会姜连生秘书长、中国航天科工集团第二研究院 203 所冯克明所长、美国西北大学 Yonggang Huang 教授、千人计划学者浙江大学邹鸿生教授、IEC/TC49 副秘书长 Y. Yamamoto 等出席了会议. 华中科技大学常务副校长林萍华教授到会并致辞, 他对全体代表的到来表示热烈欢迎, 并简要介绍了华中科技大学的办学理念、科研情况及产业发展状况. 来自西安交通大学的姚熹院士代表 IEEE UFFC 发言, 介绍了 IEEE UFFC 的基本情况; 中国力学学会副理事长方岱宁教授代表中国力学学会讲话, 对会议的召开表示祝贺; 姜连生秘书长代表中国电子元件行业协会压电晶体分会、东晶电子股份公司池旭明总工程师代表压电元器件企业、中国航天科工集团第二研究院 203 所冯克明所长代表中国宇航学会计量与测试专业委员会分别作了发言. 接着, 程序委员会主席、华中科技大学胡元太教授介绍了本次大会议程, 大会设主会场 1 个、分会场 4 个, 分为大会报告, 分组报告和学生竞赛报告等. 本届会议组委会执行主席、宁波大学王骥教授致辞, 简要回顾了全国压电和声波理论及器件技术研讨会的历史及发展历程, 介绍了全国压电和声波理论及器件技术研讨会与全国频率控制技术年会合并召开的意义和宗旨, 并预祝会议圆满成功.

会议收到学术论文 210 篇, 内容涉及压电材料 (陶瓷、晶体等)、表面波/体波理论、压电器件 (谐振器、传感器、换能器等) 设计与分析、超声技术、压电器件的加工与制造技术、振荡器和滤波器的设计与制造、原子钟技术、守时与同步技术、频率综合技术等相关主题. 在

大会报告中, 中国科学院院士、西安交通大学姚熹教授系统深入地介绍了在新型压电材料和反铁电材料研究方面的主要工作和进展, 包括高性能弛豫铁电单晶的研究, BS-PT 高居里温度压电陶瓷材料的研究以及反铁电材料及应用研究等; 中国科学院院士、浙江大学杨卫教授报道了他们在 MPB 铁电单晶的畴变相变与缺陷演化方面的工作, 研究发现多种相结构和畴结构共存是 MPB 附近 PMN-PT 铁电单晶超高压电、铁电性能的重要结构原因, 且多种畴结构共存的 R 和 M_C 相具有较好的抗电疲劳性能; 203 所冯克明所长报告了原子钟技术及其应用; 美国西北大学 Yonggang Huang 教授就新一代可伸展电子器件中的力学问题进行了探讨, 引起了与会代表的极大兴趣; 中国力学学会副理事长、北京大学方岱宁教授从固体力学与材料物理相结合的角度系统介绍了电磁固体在力-电-磁-热多场耦合下的变形与断裂研究; IEC/TC49 副秘书长 Y. Yamamoto 详细介绍了国际电工协会 (IEC) 中的压电器件及频率控制技术委员会 (TC49) 的各项活动, 希望 SPAWDA 能积极参加该组织的各项活动. 在后来的大会报告中, 湘潭大学郑学军教授、浙江大学邹鸿生教授和华中科技大学朱宏平教授等还就压电材料、结构和频率控制等相关领域的前沿进展及未来发展方向进行了系统介绍, 极大地丰富了与会代表对相关领域和方向的认识. 在分会场报告和学生竞赛报告中, 共有 169 个报告参加了交流. 经过严格评审, 10 名学生代表获得竞赛优胜奖, 华中科技大学土木工程与力学学院朱宏平院长和锐康晶体有限公司叶竹之董事长在闭幕式上为学生竞赛优胜者颁发了获奖证书和奖金.

这次会议是全国压电和声波理论及器件技术研讨会与全国频率控制技术年会第一次尝试合并举行, 旨在加强高校、研究机构和企业之间更多更广泛的交流, 并通过技术合作和人才培养等方式整体提升压电器件和频控行业的技术创新能力, 促进电子、通讯和传感等技术领域应用水平的大幅度提高, 从而建设一个属于压电器件和频控行业共同拥有的技术交流平台.

本次会议完成各项议程, 达到了预定目标, 取得了圆满成功. 会议组委会决定 SPAWDA10 将于 2010 年在厦门举行.