

· 研究进展 ·

# “近空间飞行器的关键基础科学问题” 重大研究计划结题综述

杜善义<sup>1</sup> 方岱宁<sup>2</sup> 孟松鹤<sup>1</sup> 谢惠民<sup>3</sup>  
詹世革<sup>4\*</sup> 张攀峰<sup>4</sup> 孟庆国<sup>4</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001; 2. 北京理工大学 先进结构技术研究院, 北京 100081;  
3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 4. 国家自然科学基金委员会 数理科学部, 北京 100085)

**[摘要]** 本文介绍了“近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划的立项背景、总体科学目标、总体布局、实施思路及总体完成情况,并概述了在该领域下一步发展的建议。

**[关键词]** 重大研究计划;近空间飞行器;综述

近空间一般是指 20—100 km 的空域,空气稀薄、局部风场稳定、太阳能资源丰富。很长一段时间内这个具有“特殊”的大气环境特征的空域在空间飞行器的发展中被忽略,或由于其科学问题的“高难度”而被迫放弃对其进行深入的探索。现代科技的发展表明,如果充分利用这个空域“稀薄”的空气提供飞行器气动升力和吸气式发动机的“氧化剂”,减缓气动阻力和气动加热,使得高效、可靠的大气层内高超声速飞行成为可能。同时,也正是这层“稀薄”的空气带来了诸多的困难,对人类认知能力和技术实现带来艰巨的挑战。近空间飞行器是指能够飞行在近空间执行特定任务并能长时间驻留的飞行器,是实现快速远程输送、精确打击、远程实时侦察、持久高空监视、情报搜集和通信中继等任务最为有效的手段,其特殊的战略价值已受到世界各国的重视。因此,近空间飞行器的发展涉及国家安全与和平利用空间,是目前国际竞相争夺空间技术的焦点之一,是综合国力的体现。近空间高超声速飞行技术已成为 21 世纪国际空天技术竞争的战略制高点,许多发达国家都将其列为国家的重要战略目标。

## 1 立项实施情况

### 1.1 立项背景

2001 年中国科学院数理学部和技术学部的 8

位院士针对空天飞行器的作用、地位以及国内外形势进行了深入的调研,提出了《21 世纪我国空天安全面临的严峻形势和当前应采取的对策》建议书,指出基础研究重视不足严重制约了我国自主创新和取得应对未来空天安全所需的技术储备的能力。国家自然科学基金委员会(以下简称“基金委”)由数理科学部牵头,在 2002 年启动了“空天飞行器的若干重大基础问题”重大研究计划,是我国首次在国家层面设立的有关空天飞行器基础研究的计划。旨在引导各方力量的聚集,对具有国家战略需求和原始创新思想的空天飞行器的核心问题开展研究,为引导我国未来空天飞行器的研制奠定技术创新的基础。随着该计划的实施,近空间高超声速飞行器技术在空天飞行器未来发展的核心作用愈显突出,战略作用愈发突出,国家重大需求愈发强烈。基金委数理科学部于 2006 年组织召开了“临近空间飞行器的发展趋势和重大基础科学问题研讨会”,会议得到了总装备部、国防科工委、航天航空部门、中国科学院和高等院校等相关部门和专家的积极响应和高度重视,与会专家认真研讨了近空间飞行器的需求背景、发展状况、核心科学问题和关键技术。基金委明确“基础研究要为国家重大需求服务”的指导思想,基于“重大研究计划”要“坚持服务国家目标与鼓励自由探索相结合”的指导思想,2007 年启动了“近空间飞

收稿日期:2017-01-25;修回日期:2017-02-17

\* 通信作者,Email: zhansg@nsfc.gov.cn

行器的关键基础科学问题”重大研究计划。

### 1.2 总体科学目标

“近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划以30—70公里中层近空间的高超声速远程机动飞行器涉及的科学问题为研究重点,总体科学目标为<sup>[1,2]</sup>:

(1) 在前沿领域研究方面,形成近空间飞行器关键基础科学问题的创新理论与方法,在国际上占有一席之地,为国家相关技术的形成与发展提供基础源泉;

(2) 在技术方法的源头创新上有所突破,提升我国在相关领域的自主创新能力,支撑相关技术的跨越式发展;

(3) 在该领域聚集和培养一支站在国际前沿、具有理论和源头技术创新能力的优秀研究人才队伍,促进该领域若干个跨学科的基础研究平台的形成,支撑我国近空间飞行器技术的可持续发展。

### 1.3 总体布局和实施思路

在计划的实施过程中重点突出两条主线:一是推动相关学科自身发展的基础研究,二是基础研究对近空间飞行器应用研究和关键技术解决的引领与支撑。重视将该重大研究计划两条主线有机交织在一起,为我国近空间飞行器发展形成新一代的源头创新能力和前瞻的科技储备。

为了实现该计划的总体目标,也为了更好地在该重大研究计划中体现出“有所为,有所不为”的原则并突出重点,指导专家组经过反复论证确定了该重大研究计划以“近空间飞行环境的空气动力学”、“先进推进理论和方法”、“超轻质材料/结构及热环境预测与防热”、“高超声速飞行器智能自主控制理论和方法”4个核心科学问题作为重点资助领域和方向进行项目部署。指导专家组对4个核心科学问题的难点和要点进行了深入分析和分解,选择影响近空间飞行器长远发展和重大工程需求中急需解决的共性基础问题开展研究。

在“近空间飞行环境的空气动力学”方面,重点研究近空间高速飞行高温、非平衡、粘性干扰、稀薄气体效应和湍流效应耦合作用机理,气动特性预测方法,热环境预测与热防护机理、宽马赫数机动飞行原理与方法等问题;在“先进的推进理论和方法”方面,重点研究超声速燃烧理论与方法、超声速流动与燃烧的相互作用、高效进排气与一体化、燃烧室热防护与热环境流固耦合问题,加强地面实验模拟和流场诊断方法研究,积极探索新的推进原理和方法;在

“轻质、耐高温材料/结构与热响应预测及热防护”方面,重点研究轻质/多功能材料和结构、超高温非烧蚀材料和结构研究一体化设计和多学科优化理论和方法、服役环境下材料响应机理、新材料制备和表征方法等问题,强化分析和试验手段研究,积极探索新型主/被动结合的防/隔热原理和机制;在“高超声速飞行器智能自主控制理论和方法”方面,建立面向控制的飞行器动力学建模与验证方法,重点开展高超声速飞行器稳定性与机动性协调飞行控制理论和方法、可适应参数大范围变化的强鲁棒自适应控制理论与方法、高超声速飞行器的结构动力学分析和控制的理论与方法等研究,积极探索可变体飞行气动原理与控制方法。

为解决上述核心科学问题,在该计划的实施过程中按时间段设立阶段性目标,在不同阶段设计不同的工作重点。各阶段的重点工作内容如下:

第一个阶段为播种阶段,主要着力发展新理论、新方法、新概念,探索和发现未知的科学问题,全面推动相关研究工作,实现核心科学问题的全面布局;

第二个阶段为成长集成阶段,重点强调基础研究战略性、前瞻性,并重视基础研究对应用研究的支撑作用;促进成果的转化和辐射;强化重点方向,积极推动集成、交叉,实现重点方向的突破;

第三个阶段为升华阶段,重视进一步推进深度集成和交叉,努力提高成果层次,促进成果升华;同时,加强团队和平台建设;推动跨越式发展。

从该计划实施的整体过程来看,3个阶段相辅相成,每个阶段都有确定的重点和目标;通过以点带面的方式,有效地推动了该计划各项工作的顺利实施。

该重大研究计划实施9年过程中,形成了较为合理的布局,体现了指导专家组顶层设计的思想,反映了“气动需先行、动力为核心,结构与材料是基础,控制问题是关键”的近空间高超声速飞行器科学与技术特征。其中“近空间飞行环境的空气动力学”核心科学问题,形成了“近空间高超声速空气动力学理论与建模”、“高超声速热环境预测与试验技术”、“高超声速飞行器气动布局原理”、“高超声速飞行器飞行与控制原理”4个项目群;“先进推进理论和方法”核心科学问题,形成了“高超声速进气道设计方法与流动控制”、“超声速燃烧机理”、“超燃冲压发动机热防护”、“超燃冲压发动机控制”、“新概念推进”、“测量与试验技术”6个项目群;“超轻质材料/结构及热环境预测与防热”核心科学问题,形成了“热/力

耦合机理与分析方法”、“轻质多功能材料及结构”、“高温防隔热材料”、“高温透波材料”、“材料性能表征与测试技术”、“新材料、新原理探索”6个项目群；“高超声速飞行器智能自主控制理论和方法”核心科学问题，形成了“乘波体高超声速飞行器控制问题”、“高超声速滑翔飞行器控制问题”、“可变体高超声速飞行器”、“高超飞行器气动、弹性、稳定性和机动性研究”、“结构振动主动监控与热弹性颤振控制研究”5个项目群。

强化重点支持项目是该重大研究计划的重要特色，坚持“问题重大、学科交叉、资源整合、综合集成”的原则，指导专家组根据科学问题的重要程度、成熟程度和继承程度设置不同的重点资助方向，明确要求申请的项目应体现核心科学问题内及相互间的学科交叉和研究队伍的优势互补。如在提高超燃效率的“超声速燃烧传播和稳定”、我国研究基础比较薄弱的“发动机主动冷却”方面分别资助了2个重点支持项目；针对轻质化、高性能化的“轻质/多功能材料和结构一体化设计和优化”、“新型热防护材料体系探索”方面资助了多个重点支持项目；围绕“高超声速飞行控制”问题，重点资助了姿态精细控制、自主协调控制、自适应控制及智能控制的系列重点支持项目。通过顶层设计，在这些重要或薄弱环节明显加强了资助和研究力度，有利于关键科学问题的突破。同时以重点支持项目为龙头、带动相关培育项目的形式，积极促进了“项目群”的形成，通过“项目群”交流，促进课题组之间相互启发、相互借鉴、相互合作，避免低水平重复，提高创新能力。

在计划的实施过程中，通过项目群和适度提高资助强度等方式，聚集不同领域的专家队伍，围绕近空间高超声速远程机动飞行器为背景所涉及的重大科学问题开展研究，为不同领域的科技人员提供了基础研究的平台和学科交叉研究与交流的环境，促进了源头创新，实现了集成升华的目标。

## 2 总体完成情况

该计划实施9年间，共资助项目168项，其中重点支持项目26项，集成项目7项，培育项目135项。参研人员共发表期刊论文2383篇，包括国际期刊论文1327篇，国内期刊论文1056篇。申请国内专利398项，授权270项。获得国家级奖励13项，其中：国家自然科学二等奖9项，国家技术发明二等奖4项；国际学术奖4项；省部级奖励22项，其中：一等奖12项，二等奖10项。参研人员中1人当选为中

国科学院院士，1人当选为俄罗斯科学院院士；6人成为长江学者特聘教授，7人获得国家杰出青年科学基金资助，9人获得优秀青年科学基金项目资助，10人获得教育部新世纪人才基金的资助。组织国际会议82次，国内会议157次；在国际重要学术会议做特邀报告150次；在国内重要学术会议做特邀报告192次。

该计划实施中积极贯彻“需求做牵引、基础为基点；思路要不同、探索是根本；储备于未来、跨越再提升”的工作方针，为实现跨越式发展，一方面立足于学科的前沿领域，突出在前沿领域的源头创新，另一方面重视研究的基础性，紧扣核心科学问题，并重视基础研究对应用研究的支撑作用；促进成果的转化和辐射。分别在4个核心科学问题的相关研究方向取得了重要成果，提升了源头创新能力和基础研究水平。

### 2.1 近空间飞行环境的空气动力学方面的研究进展

针对高超声速稀薄流动和化学非平衡流动及气动加热问题，提出了具有定量物理意义的流动判据，已成功应用于航天器气动加热的工程快速估算。开展了复杂旋涡流动机理研究，发现了新的流动现象和流动结构，提出了三维可压缩非定常分离流理论和新的计算方法。结合所提出的无烧蚀主动冷却热防护方案，建立了非平衡气动热与防热材料耦合计算模型，开展了碳/碳化硅复合材料氧化烧蚀过程的机理分析，提出了对流/辐射/热传导相耦合的计算分析方法，并进行了试验验证。在高超声速飞行器流动特性测试方法和技术方面，建立了高超声速风洞磷光热图技术，突破了传统传感器测量技术在飞行器复杂部位的测量局限性。通过测量表面热流率分布、表面脉动压力分布及高速纹影获得了高超声速条件下层流、转捩、湍流分离流动规律<sup>[3-9]</sup>。

### 2.2 先进推进理论和方法方面的研究进展

建立了燃烧反应热力学和动力学参数的计算新方法，构建了新型的燃烧数据共享和燃烧机理在线分析平台。提出了超燃冲压发动机主动冷却的双压裂解新方案，解决了高温高压裂解燃料结焦问题。自主开发出大涡/雷诺平均数值模拟平台，解决了超声速流动和燃烧相互作用难题。提出了局部补氧拓展燃烧稳定性的新方法，揭示了主要参数对碳氢燃料超声速燃烧熄火极限规律，极大地提高了火焰稳定性。结合飞行器动力系统进气道设计的需求，提出了曲面压缩概念，实现了由出口气动参数或压缩

面气动参数要求的型面反设计,为高性能高超声速进排气系统的气动设计提供了全新的设计方法。研制成功低成本近空间科学与技术飞行试验平台,并成功进行了首发飞行试验;该平台是继美国和澳大利亚联合研制的 HiFIRE 后世界上第二个低成本近空间高超声速通用试飞平台,大幅降低了研制成本和周期,提高了试验效率<sup>[10-17]</sup>。

### 2.3 超轻质材料/结构及热环境预测与防热方面的研究进展

结合近空间飞行器飞行环境的需求,在新型轻质材料结构、热防护材料和结构等相关方向取得重要研究进展。提出了三维点阵复合材料结构的纤维束穿插编织方法和二次铺层工艺,解决了面板和芯层界面强度低的难题,基于该工艺建立了航天行业标准,已成功应用于新一代运载火箭、亚轨道重复使用运载器的轻量化设计。建立了结构和材料一体化设计、层级结构设计优化理论及多功能协同设计理论框架;解决了轻质材料/结构设计中的最优解对称性难题。同时,通过仿生设计陶瓷表面结构增强陶瓷抗热震阻力的新概念和新方法,使陶瓷表面热阻增加了近万倍,有效地克服了陶瓷热震失效。结合新型飞行器总体设计的需求,发展了先进的热防护方案设计和实现技术,解决了材料体系设计、结构连接、过渡、匹配和工艺实现等关键问题,为高超声速飞行器提供了新的技术途径。在热障涂层失效理论方面有所突破,以纳米颗粒陶瓷涂层/镍基超合金体系作为近空间飞行器表层材料,建立了同时考虑应变梯度效应和界面效应的跨尺度力学理论,成功地预测出涂层体系的破坏特征。发展了热防护材料力学性能的新型检测技术,实现了结构级热防护系统地面考核的可视化测量,解决了航天热防护地面考核中高温在线测量难题<sup>[18-26]</sup>。

### 2.4 近高超声速飞行器智能自主控制理论和方法方面的研究进展

提出了近空间高超声速飞行器多通道协调控制的新概念及方法。研究了不可解耦条件下的近空间高超声速滑翔式飞行器多通道协调控制新方法,突破了传统的解耦控制设计套路,丰富了高超声速飞行器飞行控制系统设计理论与方法;提出了吸气式高超声速飞行器精细姿态控制新概念,建立了精细姿态控制系统设计新方法,并应用于乘波体高超声速飞行器的精细姿态控制,解决了超然冲压发动机的高效工作和吸气式高超声速飞行器的稳定飞性课题;同时,在飞行器颤振抑制等方面取得重要进展,

提出了基于 HHT 在线辨识自适应结构滤波的主动控制律设计方法,可有效抑制飞行器的颤振。建立了舵系统颤振地面仿真试验系统,实验验证了高超声速飞行器颤振抑制方法<sup>[27-32]</sup>。

该重大研究计划的实施,不仅在近空间飞行器的关键基础科学问题方面有所突破,还在人才培养方面取得了突出的成绩,总体上包括以下几个方面:

(1) 一批新成立的高等院校航空航天院系伴随着该计划成长起来,拓展完善了我国航空航天人才培养平台,培养了一批硕士生和博士生;有效地促进了航空航天研究队伍与非航空航天研究队伍的结合,促进了相关方向科研人员的协同创新能力。

(2) 培养了一批优秀的学术带头人和青年学术骨干,在学科前沿领域做出有影响力的工作,获得各种人才称号和人才基金的支持。

(3) 一批学者成长为重大科研项目的负责人或学术骨干,成为我国航空航天科技事业中的一支重要和不可或缺的高端人才队伍。

为了加强对研究目标和核心科学问题的引导,使参研人员能够更深入地了解近空间飞行器相关研究背景和发展现状,推动该重大研究计划的实施,通过指导专家组的顶层设计,在计划实施中开展了多种形式的学术交流活动,其中包括年度学术会议、专题研讨会、集成项目联合研讨会等。通过大会和小型高端研讨会的不同形式,推动学术交流,促进关键科学问题的解决。从该计划的启动到结束,举办年度学术交流会共 8 次,建立了我国近空间飞行器领域最重要的大型学术交流平台;举办小型高端研讨专题会共 10 次,主要针对特定科学问题进行专门讨论,旨在促进关键科学问题的突破,增强协同创新的能力,推动了研究成果的集成与升华。总体来看,该类研讨会效果较好,可以有针对性地解决一些共性问题,有效地推动了学科发展和基础研究成果的工程应用。

## 3 下一步发展的建议

总体而言,该重大研究计划充分发挥了基础研究为国家重大需求服务的引领作用,大幅度提升了我国该领域基础研究水平;所取得的研究成果对国家重大专项和高超工程的发展起到了重要的支撑作用;凝聚和培养了一批从事基础研究的科研人员和团队,扩大了重大研究计划的影响。

我们特在此提出下一步发展的建议,具体如下:

(1) 在基金委两个重大研究计划的支持下,对

高超声速飞行器关键技术和基础科学问题的研究获得了持续资助和稳定发展,全面提升了我国在该领域基础研究综合创新能力,有力支撑了国家重大需求关键技术的突破,为可持续发展奠定了坚实的基础。但是,对于未来新型高超声速飞行器的研究仍面临着许多新问题和挑战,迫切需要长期稳定、目标明确的基础研究投入和支持。需要按照“需求牵引”的原则继续推行重大项目或重大研究计划,与工业部门保持紧密联系,以保证近空间飞行器研究平台不断发展、研究团队不断壮大。

(2) 当前正值国家重大科技体制改革时期,对基础和创新能力建设提出了迫切需求。对于近空间高超声速飞行器基础研究来说,在鼓励自由探索、增强源头创新能力的同时,还要明确从基础前沿、关键技术到应用示范过程中基础研究的定位、作用与贡献,顺应时代发展的潮流,找准定位,继续聚焦国家重大战略任务,开展战略性、基础性、前瞻性重大科学问题研究,既要抱有“十年磨一剑”的心态,又需要进一步加强积极转化的理念。

(3) 高超声速飞行器的发展迫切需要力学学科的介入,也是实现振兴力学学科,实现“顶天立地”目标的机遇和挑战;要求力学工作者能够针对所研究的对象和服役环境,准确地提炼科学问题,积极探索、勇于创新。同时还要重视将科研成果应用于解决工程问题,实现“从实践中来,再到实践中去”的回归。根据近空间飞行器基础研究的特点,需要发展考虑更为真实条件下适用的理论和方法,研究新的实验技术,使得力学学科能够更好地发展,并将力学研究成果服务于国家重大需求。

(4) 高超声速飞行器研究兼顾科学性、技术性和工程性的特点。涉及学科包括动力、控制、燃烧、力学、材料等多个学科,具有多学科交叉和强耦合的特点,研究中需要学科间的深层次交叉、院校及企业部门的深度融合。如何采用有效的措施,推动深层次的交叉和协同创新值得进一步思考。建议设立新的项目资助模式和管理体制,如设立“跨学科基础研究项目”和“跨学科科学仪器研制项目”等。借鉴国外科研项目的设计思路和管理方法,推动我国跨学科的研究能力和平台建设,促进交叉学科研究人员思想的碰撞与融合,吸引更多的高水平人才充实高超声速飞行器基础研究的力量。

**致谢** 该重大研究计划实施9年过程中成果显著,该计划的研究工作虽然侧重基础研究,但也具有兼

顾科学性、技术性和工程性的特点。特别是涉及工程性的成果在很多情况下是无法公开的,但该类成果的作用同样是重要的。特在此对所有对该计划做出贡献的参研人员表示衷心的感谢和最诚挚的敬意!指导专家组、管理工作组和秘书组在重大研究计划实施过程中付出了辛勤的工作,再次表示衷心的感谢!

## 参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会数学物理科学部. “近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划实施规划书(内部报告).
- [2] 国家自然科学基金委员会数学物理科学部. “近空间飞行器的关键基础科学问题”重大研究计划总结报告(内部报告).
- [3] Liu XL, Zhang SH, Zhang HX, Shu CW. A new class of central compact schemes with spectral-like resolution II: Hybrid weighted nonlinear schemes. *Journal of Computational Physics*, 2015, 284: 133 - 154.
- [4] Zhang SH, Li H, Liu XL, Zhang HX, Shu CW. Classification and sound generation of two-dimensional interaction of two Taylor vortices. *Physics of Fluids*, 2013, 25: 56 - 103.
- [5] Wang ZH, Bao L, Tong BG. Rarefaction criterion and non-Fourier heat transfer in hypersonic rarefied flows. *Physics of Fluids*, 2010, 22: 126103 - 126107.
- [6] Du YX, Xiao GM, Gui YW, Liu L, Zhang LN, Yu MX. Study on heat transfer characteristics of phase-change energy storage unit for thermal management. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35: 1577 - 1589.
- [7] 国义军,代光月,桂业伟,童福林,邱波,刘骁. 碳基材料氧化烧蚀的双平台理论和反应控制机理. *空气动力学学报*, 2014, 32(6): 755 - 760.
- [8] Li SX, Wang K, Ni ZY. The visualization of three-dimension shock wave structure in hypersonic flow using schlieren photography and laser vapor screen technique. *The 11th Asian Symposium on Visualization, Japan*, 2011.
- [9] 毕志献,韩曙光,伍超华,宫建,张红杰,师丽丽,李成宇. 磷光热图测热技术研究. *实验流体力学*, 2013, 27(3): 87 - 92.
- [10] Wang QD, Fang YM, Wang F, Li XY. Skeletal mechanism generation for high-temperature oxidation of kerosene surrogates. *Combustion and Flame*, 2012, 195: 91 - 102.
- [11] Zhang TC, Wang J, Fan XJ, ZP. Combustion of vaporized kerosene in supersonic model combustors with dislocated dual cavities. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(5): 1152 - 1160.
- [12] Yuan YM, Zhang TC, Yao W, Fan XJ. Study on flame stabilization in a dual-mode combustor using optical measurements. *Journal of Propulsion and Power*, 2015, 31(6): 1524 - 1531.
- [13] 张林,张堃元,王磊,李永洲. 基于等熵压缩面型面坐标变换的二维曲面压缩面研究. *航空动力学报*, 2014, 29(09): 2031 - 2039.
- [14] 杨顺凯,张堃元,王磊,李永洲. 流量系数可控弹性自适应高超进气道研究. *推进技术*, 2014, 35(12): 1592 - 1597.
- [15] Tan HJ. Experimental investigation of the unstart process of a generic hypersonic inlet. *AIAA Journal*, 2011, 49(2): 279 - 288.

- [16] Wang HB, Wang ZG, Sun MB, Wu HY. Combustion modes of hydrogen jet combustion in a cavity-based supersonic combustor. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38: 12078 - 12089.
- [17] Sun MB, Gong C, Zhang SP, Liang JH, Liu WD, Wang ZG. Spark ignition process in a scramjet combustor fueled by hydrogen and equipped with multi-cavities at mach 4 flight condition. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 43:90 - 96.
- [18] S Xu, Y Cai, G Cheng, Volume preserving nonlinear density filter based on heaviside functions. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, 41(1): 495 - 505.
- [19] Fan HL, Fang DN, Chen LM, Dai Z, Yang W. Manufacturing and testing of a CFRP sandwich cylinder with Kagome cores. *Composites Science and Technology*, 2009, 69 (15 - 16): 2695 - 2700.
- [20] Song F, Meng SH, Xu XH, Shao YF. Enhanced thermal shock resistance of ceramics through biomimetically inspired Nanofins. *Phys Rev Lett*, 2010, 104(12): 125502.
- [21] Zhao D, Zhang CR, Hu HaF, Zhang YD. Ablation behavior and mechanism of 3D C/ZrC composite in oxyacetylene torch environment. *Composites Science and Technology*, 2011, 71: 1392 - 1396.
- [22] Qi F, Meng SH, Guo H. Repeated thermal shock behavior of the ZrB<sub>2</sub>-SiC-ZrC ultrahigh-temperature ceramic. *Materials & Design*, 2012, 35: 133 - 137.
- [23] Deng JD, Yan J, Cheng GD. Multi-objective concurrent topology optimization of thermoelastic structures composed of homogeneous porous material. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 47(4): 583 - 597.
- [24] Liang LH, You XM, Ma HS, Wei YG. Interface energy and its influence on interface fracture between metal and ceramic thin films in nanoscale. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108:84317.
- [25] Dong XL, Feng X, Hwang KC, Ma SP, Ma QW. Full-field measurement of nonuniform stresses of thin films at high temperature. *Optics Express*, 2011, 19(14): 13201 - 13208.
- [26] Wu LF, Zhu JG, Xie HM. Single-lens 3D digital image correlation system based on a bilateral telecentric lens and a bipyramid. *Validation and Application*, 2015, 54 (26): 7842 - 7850.
- [27] Duan ZS, Huang L, Yao Y, Jiang ZP. On the effects of redundant control inputs. *Automatica*, 2012, 48 (9): 2168 - 2174.
- [28] Peng ZX, Yang Y, Huang L. The effects of input redundancy in time optimal control. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37 (2): 222 - 227.
- [29] 孟中杰, 闫杰. 弹性高超声速飞行器建模及精细姿态控制. *宇航学报*, 2012, 8: 1683 - 1687.
- [30] 孟中杰, 闫杰. 高超声速弹性飞行器振动模态自适应抑制技术. *宇航学报*, 2012, 10: 2164 - 2168.
- [31] Yang C, Yang YX, Wu ZG. Shape sensitivity analysis of flutter characteristics of a low aspect ratio supersonic wing using analytical method. *Science China: Technological Sciences*, 2012, 55(12): 3370 - 3377.
- [32] 刘晓燕, 杨超, 吴志刚. 适用于气动弹性的气动力自适应辨识方法. *工程力学*, 2010, 27(12): 201 - 205.

## Review of the achievements of Major Research Plan on “Key Fundamental Scientific Problems on Hypersonic Vehicle”

Du Shanyi<sup>1</sup> Fang Faining<sup>2</sup> Meng Songhe<sup>1</sup> Xie Huimin<sup>3</sup>  
Zhan Shige<sup>4</sup> Zhang Panfeng<sup>4</sup> Meng Qingguo<sup>4</sup>

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001; 2. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081;  
3. Tsinghua university, Beijing 100084; 4. Department of Mathematical & Physical Science,  
National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085)

**Abstract** In this paper, the background, scientific objectives, layout, implementation ideas, and the overall outcome are introduced about the major research plan “Key fundamental Scientific Problems on Hypersonic Vehicle”. The suggestion of future development in the relative fields are also offered.

**Key words** Major Research Plan; hypersonic vehicle; review