

# 进入行星大气极端流动与传热基础科学问题

## 重大研究计划 2026 年度项目指南

深空探测任务中，探测器以超过第一宇宙速度进入地外行星大气或返回地球大气，周围的气体受到强烈压缩和剧烈摩擦，探测器巨大的动能向气体内能转换，能量随流动运输、向周围传递，引发伴随超高温理化反应的极端流动与传热现象，严重影响飞行安全。本重大研究计划面向我国深空探测任务重大需求，旨在科学认知并精确把控进入行星大气飞行的关键物理机理和效应，创新发展极端流动与传热理论，引领相关领域科学前沿和技术发展，支撑航天强国战略。

### 一、科学目标

阐明进入行星大气飞行极高速复杂流动时空多尺度关联、多过程耦合作用机理，揭示强辐射与强对流多机制加热环境中材料响应与热量耗散机制，发展自主可控的超高温多相态理化反应动力学模型与基础数据库，建立可精确表征多相态、多尺度、多过程强耦合的极端流动与传热理论体系，为深空探测重大战略任务提供创新概念和解决方案，并提升我国解决重大科学问题的能力和世界影响力。

### 二、核心科学问题

#### （一）极高速复杂流动多过程耦合作用机理。

针对极高速复杂流动的多尺度、多过程强耦合特征，创新跨学科分析框架与模拟方法，形成最高速度 50000m/s 的极端流动模拟预示能力，揭示流动基本过程与理化过程、传热传质过程的耦合竞争机制；阐明流场中

能量、化学组分非平衡输运行为，厘清探测器进入行星大气过程中流动结构生成演化与致热机理。

**(二) 强辐射传热环境材料响应与防热机制。**

针对强辐射与强对流多机制加热环境下高效可靠协同防热设计要求，深入分析并厘清环境-材料耦合中的能量转移和热量耗散机制，揭示防热材料响应机理；创新发展辐射热高效防护和传热传质调控方法，建立面向进入行星大气飞行环境的多机制协同防热设计理论。

**(三) 行星大气超高温多相态非平衡理化反应机理。**

针对行星大气高激发非平衡理化反应特征，创新超高温反应的计算与实验表征测量方法，揭示超高温内能激发弛豫、反应、辐射跃迁等机理，发展多相态非平衡理化反应动力学表征建模理论，构建最高温度 50000K、多行星大气组分的高置信度理化反应模型和基础数据库。

### **三、2026 年度资助研究方向**

**(一) 培育项目。**

围绕上述科学问题，以总体科学目标为牵引，对于探索性强、选题新颖、前期研究基础较好的申请项目，将以培育项目的方式予以资助，具体研究方向如下：

**1. 极高速流动的模拟理论与预示方法。**

从微观、介观或宏观不同描述层次发展新型极高速流动数值模拟方法，探索基于人工智能的复杂流动结构特征提取与演化预测方法，完善不同流域极高速流动的模拟理论和方法体系。

**2. 极高速流动及其输运行为机理研究。**

研究探测器极高速进入行星大气高温复杂流动机理，阐释地面实验模拟与真实飞行之间的差异性与相关性，揭示高温流场中的辐射输运与传热机理、多相态烧蚀产物输运与致力致热机理。

### **3. 多机制加热环境表征与辐射热耗散特性建模。**

研究进入行星大气多机制加热环境与防热材料耦合的实验模拟表征方法，构建数据/物理融合的热载荷高效高精度反演方法，研究激波层辐射热在防热材料内部的耗散特性，建立辐射穿透、吸收、散射等物理过程的精细化表征模型。

### **4. 防热材料辐射调控与新型降热技术。**

提出防热材料内部辐射热输运特性的调控方法，发展辐射热屏蔽与阻隔技术，探索辐射热高反射、磁控降热、辐射-对流协同防护等降热新原理、新方法，突破传统烧蚀防热的性能瓶颈。

### **5. 行星大气超高温理化反应机理研究。**

发展第一性原理计算方法、高平动能重粒子/低能电子实验技术，开展多自由度激发、电离、电荷转移、辐射等物理过程和解离、化合等化学反应过程的研究，揭示多种行星大气组分及烧蚀产物组分非弹性碰撞散射机理，分析电子-核运动耦合的非绝热效应，获取关键反应系统性数据并量化置信度。

### **6. 超高温大气环境气固反应机理和参数研究。**

发展高精度的理论计算方法和气固作用实验模拟方法，研究行星大气超高温环境下气固界面作用和传能机理，揭示高激发态原子分子离子与固

体表面相互作用机理，获取相关碰撞动力学参数并量化置信度，构建气固反应的多尺度模型。

## （二）重点支持项目。

围绕前沿科学问题和工程重大需求，对总体科学目标有较大贡献的申请项目，将以重点支持项目的方式予以资助，鼓励跨单位联合申报，申报项目须覆盖以下单一方向中列出的全部内容。具体研究方向如下：

### **1. 极高速热化学非平衡流动多尺度模拟方法。**

针对探测器极高速进入行星大气从稀薄流到连续流面临的多尺度流动模拟难题：发展基于态-态模型的高效高保真热化学非平衡流动数值模拟方法；发展微观、宏观不同尺度模拟方法的耦合算法；探索全流域统一模拟的多尺度数值计算框架及加速算法，形成进入行星大气极高速热化学非平衡流动全流域高效精确预示能力。

### **2. 高时空分辨的极高速非平衡流动特性测试方法。**

针对“非定常、非均匀”的极高速非平衡流动地面模拟实验环境共性测试难题：发展极高速实验来流气体状态参数瞬态测量与非平衡特性诊断技术；针对近壁面流动大梯度剧烈变化特点，发展近壁面超高温流场组分/温度/速度/光谱辐射等参数高时空分辨测量方法；探索极高速非平衡流场空间分布特性重构方法，支撑复杂流动机理研究。

### **3. 进入 CO<sub>2</sub> 大气多孔防热材料烧蚀与性能退化机理。**

针对探测器进入火星大气防热设计场景：研究典型多孔防热材料表面热化学反应与内部热解反应机制；建立 CO<sub>2</sub> 来流加热条件下防热材料表面

/体积耦合烧蚀多场响应分析预测模型;研究烧蚀过程中微观结构的演变规律,结合实验揭示关键性能退化机理。

#### **4. 激波层辐射与材料烧蚀多场耦合机理及预测模型。**

针对激波层强辐射与强对流耦合加热环境的防热设计需求:发展防热材料内部辐射热输运与热解气体引射表征模型,建立激波层辐射热/对流热与防热材料烧蚀耦合传热传质分析方法;揭示防热材料内部热输运与热传导、热化学反应及气体扩散的多过程作用机理,形成防热材料响应的多场耦合预测工具并开展实验验证。

#### **5. 行星大气电子与重粒子散射态-态截面实验研究。**

针对探测器极高速进入火星、木星和返回地球大气场景:发展振动态分辨的高精度实验测试技术;开展探测器等离子体鞘套能区的电子与火星、木星、地球等大气典型组分碰撞的电子态激发、电离、振转态激发和解离等动力学实验研究,精确测量各反应通道的分支比、绝对截面等动力学信息。

#### **6. 行星大气超高温组分高精度光学参数研究。**

面向探测器进入行星大气过程中绕流气体及烧蚀产物组分光学参数精确获取需求:研究高激发态能级结构,及电子-核运动耦合对势能曲线的影响;发展包含非绝热效应的高精度光学参数(电子-振动跃迁概率、极化率和碰撞展宽截面等)计算方法;发展高激发态光学参数的高精度测试技术,探索时间分辨光谱分析技术等先进测试技术。

### **四、项目遴选的基本原则**

(一) 紧密围绕核心科学问题，注重需求及应用背景约束，鼓励原创性、基础性和交叉性的前沿探索。

(二) 优先资助能够解决进入行星大气极端流动与传热中的基础科学难题并具有应用前景的研究项目。

(三) 重点支持项目应具有良好的研究基础和前期积累，对总体科学目标有直接贡献与支撑。

## 五、2026 年度资助计划

拟资助培育项目 20 - 30 项，直接费用资助强度约为 60 万元/项，资助期限为 3 年，培育项目申请书中研究期限应填写“2027 年 1 月 1 日 - 2029 年 12 月 31 日”；拟资助重点支持项目 5 - 7 项，直接费用资助强度约为 280 万元/项，资助期限为 4 年，重点支持项目申请书中研究期限应填写“2027 年 1 月 1 日 - 2030 年 12 月 31 日”。

## 六、申请要求及注意事项

### (一) 申请条件。

本重大研究计划项目申请人应当具备以下条件：

1. 具有承担基础研究课题的经历；
2. 具有高级专业技术职务（职称）。

在站博士后研究人员、正在攻读研究生学位以及无工作单位或者所在单位不是依托单位的科学技术人员不得作为申请人进行申请。

### (二) 限项申请规定。

执行《2026 年度国家自然科学基金项目指南》“申请规定”中限项申请规定的相关要求。

### (三) 申请注意事项。

申请人和依托单位应当认真阅读并执行本项目指南、《2026 年度国家自然科学基金项目指南》和《关于 2026 年度国家自然科学基金项目申请与结题等有关事项的通告》中相关要求。

本重大研究计划项目实行无纸化申请。申请书提交日期为 2026 年 3 月 1 日 - 2026 年 3 月 20 日 16 时。

(1) 申请人应当按照科学基金网络信息系统(以下简称“信息系统”)中重大研究计划项目的填报说明与撰写提纲要求在线填写和提交电子申请书及附件材料。

(2) 本重大研究计划旨在紧密围绕核心科学问题，对多学科相关研究进行战略性的方向引导和优势整合，成为一个项目集群。申请人应根据本重大研究计划拟解决的核心科学问题和项目指南公布的拟资助研究方向，自行拟定项目名称、科学目标、研究内容、技术路线和相应的研究经费等。

(3) 项目申请人在信息系统中选择“在线申请”——“新增项目申请”——“申请交叉科学部项目”进行项目申报。

申请书中的资助类别选择“重大研究计划”，亚类说明选择“培育项目”或“重点支持项目”，附注说明选择“**进入行星大气极端流动与传热基础科学问题**”，受理代码选择 T02，并根据申请的具体研究内容选择不超过 5 个申请代码。

**培育项目和重点支持项目的合作研究单位均不得超过 2 个。**

(4) 申请人在申请书起始部分应明确说明申请符合本项目指南中的资助研究方向（写明指南中的研究方向序号和相应内容），以及对解决本重大研究计划核心科学问题、实现本重大研究计划科学目标的贡献。

如果申请人已经承担与本重大研究计划相关的其他科技计划项目，应当在申请书正文的“研究基础与工作条件”部分论述申请项目与其他相关项目的区别与联系。

2. 依托单位应当按照要求完成依托单位承诺、组织申请以及审核申请材料等工作，于 2026 年 3 月 20 日 16 时前通过信息系统逐项确认提交本单位电子申请书及附件材料，并于 3 月 21 日 16 时前在线提交本单位项目申请清单。**未按时提交项目清单的申请将不予接收。**

### 3. 其他注意事项。

(1) 为实现重大研究计划总体科学目标和多学科集成，获得资助的项目负责人应当承诺遵守相关数据和资料管理与共享的规定，项目执行过程中应关注与本重大研究计划其他项目之间的相互支撑关系。

(2) 为加强项目的学术交流，促进项目群的形成和多学科交叉与集成，本重大研究计划将每年举办 1 次资助项目的年度学术交流会，并将不定期地组织相关领域的学术研讨会。获资助项目负责人有义务参加本重大研究计划指导专家组和管理工作组所组织的上述学术交流活动，并认真开展学术交流。

## （四）咨询方式。

国家自然科学基金委员会交叉科学部交叉科学二处

联系电话：010-62329548

