

2026 年度拟提名陕西省技术发明奖项目公示内容

一、项目名称

异质材料界面冶金调控精密钎焊关键技术与装备

二、提名者及提名意见

提名者：中共陕西省委军民融合发展委员会办公室

提名意见：

该成果面向航空航天、核工程及功率电子等重大装备对异质材料精密连接的迫切需求，发明了异质钎焊构型化复合钎料设计与制备、界面冶金反应路径选择性调控、多工序协同精密钎焊技术及装备，解决了异质母材钎料适配性不足、界面多相反应难以控制以及复杂构件制造精度与一致性差等难题。研制的系列复合钎料、精密钎焊工艺及专用装备已应用于液体火箭发动机推力室、航空发动机尾喷管构件及火警探测器、卫星功率模块、空间核反应堆电源组件等关键产品制造，成果创新突出。该项目获授权国家发明专利 37 项，制定团体及企业标准 2 项，发表 SCI 论文 112 篇；培养国家级领军 1 人次、国家级青年人才 3 人次，省部级人才 4 人次，博士研究生 9 名、硕士研究生 34 名。相关成果获得中国材料研究学会科学技术奖一等奖、中国有色金属工业科学技术奖一等奖等科技奖励，在 10 余家单位的 20 余种产品中实现应用，近三年新增销售收入约 7.09 亿元，取得了显著的经济效益、国防效益和社会效益。成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省技术发明奖提名条件，特提名为陕西省技术发明奖二等奖。

三、项目简介

异质材料精密钎焊技术与装备是实现重大装备关键构件轻量化、耐极端环境和高可靠制造的重要基础，界面冶金反应与组织性能直接决定构件的制造精度、承载能力和服役寿命。航空航天、核工程及功率电子装备广泛采用陶瓷、金属和复合材料等异质组合，但材料间化学键、晶体结构、冶金相容性和热物理性能差异显著，面临钎料与异质界面适配性不足、界面冶金反应难以控制、精密钎焊技术及装备对复杂构件的协同制造能力不足三大技术难题。

在国家科技重大专项、国家自然科学基金等项目支持下，该项目围绕异质材料界面冶金调控精密钎焊关键技术与装备，经过 10 余年持续攻关，发明了构型化复合钎料设计与制备、界面冶金反应路径选择性调控以及多工序协同精密钎焊技术及装备，形成了贯通钎料设计、界面调控、精密钎焊技术和专用装备的完整体系，实现了异质界面冶金反应、接头组织性能和复杂构件制造过程的协同控制。

主要技术发明点如下：

(1) 发明了异质钎焊构型化复合钎料设计与制备技术。通过功能组元定域配置，研制了夹芯式、多层式和颗粒增强式系列复合钎料，解决了均质钎料难以兼顾两侧异质母材的问题。 SiC_f/SiC 复材/GH536 接头抗剪强度达到 64~89 MPa，较传统银基钎料最高提高 147.2%；针对铜与石墨、陶瓷等体系，最低连接温度由 850 °C 降至 250 °C；相关技术用于矿用钻头和截齿制造后，焊缝强度提高约 30%，使用寿命提高约 1 倍。

(2) 发明了异质钎焊界面冶金反应路径选择性调控技术。通过控制关键元素的迁移方向、作用区域和反应时序，抑制母材过度溶蚀及连续脆性相生成，实现界面组织和应力状态的协同调控。典型接头峰值残余应力降低 46.2%；火箭发动机推力室直径 2 m 级热力组件尺寸变形率控制在 3% 以内，接头服役后强度保持率达到传统工艺的 3.8 倍，液压考核强度达到 115 MPa，并通过地面点火试车验证。

(3) 发明了异质界面多工序协同精密钎焊技术及装备。集成界面净化、功能层构筑、自动转序和真空钎焊工序，研制了真空多室复合装备、超声辅助真空钎焊装备及专用真空高频感应钎焊设备。装备极限真空度达到 5.0×10^{-4} Pa，最高工作温度达到 1400 °C，完成火箭发动机直径 2 m 级热力组件制造；空间核反应堆电源组件气密性由 1.0×10^{-10} Pa·m³/s 提高至 1.0×10^{-13} Pa·m³/s，界面焊合率提高至 99%。

该项目获授权国家发明专利 37 项，其中 12 项实现工程应用、2 项完成转让，制定团体及企业标准 2 项；发表 SCI 论文 112 篇，受到 20 多个国家和地区同行引用。相关成果获 2025 年度中国材料研究学会科学技术奖一等奖和 2025 年中国有色金属工业科学技术奖一等奖各 1 项，经行业评价，项目成套技术整体达到国际先进水平。

项目成果已在航天六院、中航工业和中国原子能科学研究院等 10 余家单位的 20 余种产品中应用，支撑了液体火箭发动机推力室、航空发动机火警探测器和

空间核反应堆电源组件等关键产品制造。其中，航空发动机火警探测器气密性达到 $0.2 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，单套成本由进口产品的 14 万元降至 3 万元。近三年采用项目技术的相关产品累计新增销售收入 7.09 亿元、新增利润 1.02 亿元，提升了我国重大装备异质材料关键构件的自主制造与保障能力，取得了显著的经济效益、国防效益和社会效益。

四、客观评价

1. 国内外同类技术比较

(1) 该项目采用功能组元定域配置方法,发明了夹芯式、多层式和颗粒增强式构型化复合钎料。典型 SiC_f/SiC 复材/GH536 接头抗剪强度最高达到 89 MPa,较专利对照试验中传统银基钎料接头提高 147.2%,较国外公开报道的同材料体系接头提高 255.6%;针对铜与石墨、陶瓷等体系,最低连接温度由 850 °C 降至 250 °C,显著优于国内外同类技术。(见表 1)

(2) 该项目研制了集成界面净化、功能层构筑、自动转序和真空钎焊 4 类工序的多工序协同精密钎焊装备,实现了多腔室自动传送和联合真空运行。装备极限真空度达到 5.0×10^{-4} Pa,与国外先进装备相当;最高工作温度达到 1400 °C,较国外同类装备提高 100 °C;工序集成数量由国外同类装备的 2 类提高至 4 类,并完成直径 2 m 级热力组件制造,整体性能显著优于国内外同类装备。(见表 2)

2. 应用单位评价

该项目技术成果已在西安航天发动机有限公司、北京卫星制造厂有限公司、上海航天精密机械研究所、天津航空机电有限公司、中国原子能科学研究院、中煤科工西安研究院(集团)有限公司、中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司、浙江秉鹏自动化科技有限公司、神木市久业发电有限公司等国内多家从事航空航天、核工程、能源装备和高端制造等领域的企业、研究院所应用,获得应用单位认可。部分评价如下:

(1) **西安航天发动机有限公司:** 该项目界面冶金反应调控及精密钎焊技术应用于大推力液体火箭发动机推力室直径 2 m 级热力组件制造,构件尺寸变形控制在 3% 以内,优于不超过 5% 的设计要求,液压考核强度达到 115 MPa,气压考核强度达到 23 MPa,流道内部无溶蚀和堵塞,接头服役后强度保持率达到传统钎焊接头的 3.8 倍,相关构件已通过地面试车,有力保障了相关型号研制任务的顺利实施。(其他附件 1.1)

(2) **北京卫星制造厂有限公司:** 该项目构型化复合钎料及界面反应调控技术应用于 139.7 mm×190.5 mm 高可靠 IGBT 陶瓷覆铜板制造,连接精度达到 10 μm ,焊接面平面度由 1 mm 降低至 0.2 mm。相关产品已通过试验考核,各项性能指标满足设计要求,降低了高可靠功率模块钎焊材料及连接技术对进口的依赖。(其他附件 1.2)

(3) **航空工业天津航空机电有限公司:** 该项目构型化复合钎料、多工序协同精密钎焊技术及装备应用于航空发动机火警探测器报警膜盒制造,产品气密性达到 0.2×10^{-10} Pa·m³/s,疲劳寿命达到 2 万次,振动考核时间由规定的 20 h 延长到 40 h。相关产品通过终试并实现进口替代,单套成本由 14 万元降低至 3 万元,打破了国外捆绑销售和整体更换的技术垄断,实现了关键部件的自主化制造。(其他附件 1.4)

(4) **中国原子能科学研究院:** 该项目多工序协同精密钎焊技术及专用装备应用于空间核反应堆电源燃料元件及发射极组件的生产制造,组件气密性由

$1 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 提高到 $1 \times 10^{-13} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 界面焊合率由 95% 提高到 99%, 分别优于设计要求。相关装备及技术实现了复杂异质金属组件的高气密、高可靠制造, 突破了国外技术封锁, 已应用于我国某重大科技工程。(其他附件 1.5)

(5) **中煤科工西安研究院(集团)有限公司**: 公司自 2017 年起应用西北工业大学开发的构型化复合钎料、界面反应调控及精密钎焊技术, 批量制造矿用硬质合金钻头、截齿等产品。项目技术使焊缝强度提高约 30%、产品使用寿命提高 1 倍, 相关产品已应用于国家能源集团、中国中煤能源集团有限公司等单位, 工程应用效果良好。(其他附件 1.6)

3. 国内外同行学术评价

该项目相关成果在 *Acta Mater*、*J Mater Sci Technol*、*Addit Manuf* 等领域顶级期刊共发表 SCI 论文 112 篇, 论文得到来自美国、英国、德国、日本、韩国等 20 多个国家和地区的科研工作者的正面引用与评价, 代表性学术评价如下:

(1) **中国工程院李贺军院士团队**在【*Materials Characterization*, 2024, 218:114502】中评价该项目发明点“大幅降低焊缝区晶粒生长速度, 抑制较大尺寸脆性化合物的生成, 降低了接头脆性”(leads to a very low grain growth rate, which inhibits the generation of larger sized brittle compounds and reduces joint brittleness)。

(2) **中国工程院蒋庄德院士团队**在【*Ceramics International*, 2021, 47: 22854-22863】中评价该项目技术发明点“可作为增强体改善材料性能”(can be used as a reinforcement to improve the performance of materials)。

(3) **中国工程院董绍明院士团队**在【*Ceramics International*, 2026, 52:12699-12707】中评价该项目技术发明点“陈等人研究了……, 开发了 $\text{Er}_2\text{Si}_2\text{O}_7\text{-MoSi}_2$ 密封涂层策略, ……显著提高了接头的高温可靠性”(Chen et al. also investigated……, and developed an $\text{Er}_2\text{Si}_2\text{O}_7\text{-MoSi}_2$ sealing coating strategy,……thereby significantly enhancing the high-temperature reliability of the joints)。

(4) **中国工程院涂善东院士团队**在【*Materials and Design*, 2017, 115:458-466】中正面评价了该项目技术发明点, 指出“陈等人阐述了反应机理与扩散机理对接头力学性能的贡献, ……从而提高接头强度”(Chen et al. investigated the contributions of reaction mechanism and diffusion mechanism on the mechanical property of brazing joints, and……enhance the joint strength)。

(5) **韩国科学技术研究院首席科学家 Sang Hoon Kim 教授团队**在【*Materials Science and Engineering B*, 2017, 224:93-102】中肯定了该技术发明点对焊接质量的显著提升, 认为该技术发明点应用于钎料“可以显著提高体系抵抗外力的机械强度, 对于应用于热敏性物质具有显著优势”(This offers substantial advantages for use with heat-sensitive substances, such as polyethylene terephthalate (PET) substrates, organic microchips, and conductive polymers)。

4. 已获科技奖励

该项目相关成果获得 2025 年中国材料研究学会科学技术奖一等奖和 2025 年中国有色金属工业科学技术奖一等奖各 1 项，分别在异质钎焊界面组织调控、精密钎焊技术及装备、复合钎料与界面冶金等方面获得行业认可，体现了该项目从基础理论、技术发明到工程应用的创新性、先进性及行业影响力。（其他附件 2.13、2.14）

五、应用情况和效益

1. 应用情况

该项目形成了构型化复合钎料设计与制备、界面冶金反应路径选择性调控以及多工序协同精密钎焊技术及装备，相关成果已在航空航天、核工程和功率电子等领域实现工程化应用，用于液体火箭发动机推力室、航空发动机尾喷管及火警探测器、卫星功率模块和空间核反应堆电源组件等关键产品制造。目前，项目技术已在 10 余家单位的 20 余种产品中应用，12 项专利实现工程转化，完成专利转让 2 项，制定团体及企业标准 2 项。

工程应用表明，该项目解决了大尺寸、薄壁、曲面、微流道及多材料组合构件制造中的钎料适配、界面反应、残余应力和变形控制等难题，支撑了重大科技工程和航空航天型号研制，实现了部分关键材料、部件及专用装备的自主化。根据应用及经济效益证明，近三年采用项目技术的相关产品累计新增销售收入 7.09 亿元、新增利润 1.02 亿元，取得了显著的国防效益、经济效益和社会效益。

主要应用单位情况如表 4 所示。

表 4 主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用的技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/电话
1	西安航天发动机有限公司	界面冶金反应路径选择性调控及多工序协同精密钎焊技术	大推力液体火箭发动机推力室直径 2 m 级热力组件，应用于国家重大科技工程。	2018 年至今	毛悦 /15319906303
2	北京卫星制造厂有限公司	构型化复合钎料设计制备及界面反应路径调控技术	高可靠 IGBT 功率模块陶瓷覆铜板，系列型号应用。	2021 年-2024 年	黄宁 /18612182462
3	上海航天精密机械研究所	多工序协同精密连接技术及真空多室复合装备	航天轻质结构及钛合金、TiAl 合金、高温合金构件。	2017 年至今	陈旭 /17307150812
4	天津航空机电有限公司	构型化复合钎料及多工序协同精密钎焊技术与装备	航空发动机火警探测器报警膜盒，型号应用。	2015 年至今	刘永江 /13920500993
5	中国原子能科学研	多工序协同精密钎焊技术及	空间核反应堆电源发射极组件及燃料	2017 年至今	王振东 /13466555368

	究院	专用真空高频钎焊装备	元件组件，应用于国家重大科技工程。		
6	中煤科工西安研究院（集团）有限公司	构型化复合钎料设计与制备及界面冶金反应调控精密钎焊技术	各类矿用硬质合金钻头，累计焊接 120 万余只。	2017 年至今	刘柏根 /029-81778018
7	中国机械总院集团郑州机械研究有限公司	构型化复合钎料及低温界面反应调控技术	铝基、锌基和银基系列钎料，涵盖丝状、环状及片状产品。	2013 年至今	路全彬 /18768882791
8	神木市恒聚鑫冶金有限公司	构型化复合钎料设计与制备及精密钎焊修复技术	尾气发电核心部件制造与修复，累计应用 18300 余件。	2020 年至今	刘连斌 /13669172900
9	浙江秉鹏自动化科技有限公司	精密钎焊技术及界面反应路径调控	焊接装备中真空密封组件、冷却结构及异质材料关键部件的制造，相关装备已实现市场化生产销售。	2019 年至今	刘超 /13656739566
10	神木市久业发电有限公司	构型化复合钎料与异质界面多工序协同精密钎焊技术	发电机异质材料精密部件维修，累计应用 600 余套（件）。	2019 年至今	张向如 /0912-8456227

2. 应用效益

该项目技术已在航空航天、核工程、功率电子、能源装备及高端制造等领域的 10 余家单位、20 余种产品中实现应用。2023-2025 年，表中 5 家主要应用单位采用项目技术的相关产品累计新增销售收入 7.09 亿元、新增利润 1.02 亿元，如表 5 所示。项目技术提高了相关产品的连接质量、生产效率和服役寿命，降低了关键材料、部件及装备的制造成本，推动 12 项专利实现工程应用，完成专利转让 2 项，形成了良好的产业化和推广效益。

该项目解决了大尺寸、薄壁、曲面、微流道及多材料组合构件的精密连接难题，支撑了液体火箭发动机、航空发动机、卫星功率系统和空间核反应堆等重大装备研制，突破了部分关键钎料、核心部件及专用装备的国外技术封锁，提升了我国重大装备关键构件的自主制造、稳定供给和应急保障能力，对保障国防重大工程实施和产业链供应链安全具有重要作用。项目制定团体及企业标准 2 项，促进了异质材料精密钎焊技术与装备的规范化应用和行业技术进步。形成的低温连接和长寿命制造技术减少了构件返修、更换及材料消耗，并培养了一批精密连接与先进制造领域的专业人才，取得了显著的国防效益和社会效益。

表 5 近三年应用单位采用该项目技术取得的经济效益

单位名称	新增销售额（万元）	新增利润（万元）
中煤科工西安研究院（集团）有限公司	16744.7	1708.5
中国机械总院集团郑州机械研究所有限公司	26800	5970
神木市恒聚鑫冶金有限公司	5101.2	463.3
浙江秉鹏自动化科技有限公司	9646.4	1273.8
神木市久业发电有限公司	12571.3	819.7
累计	70863.6	10235.3

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

序号	知识产权类别	知识产权具体名称	国家 (地区)	授权号	授权日期	证书编号	权利人	发明人
1	发明专利	一种钎焊陶瓷基复材与镍基高温合金的夹芯钎料制备方法	中国	ZL202310906328.9	2025 年 9 月 23 日	8296917	西北工业大学	陈海燕, 王鹏, 仵鑫, 赵帅, 王鹏程, 杨夏炜, 徐雅欣, 李文亚
2	发明专利	一种地外环境焊接的重力水平地面模拟装置及方法	中国	ZL202310461660.9	2025 年 12 月 23 日	8597487	西北工业大学	陈海燕, 孔祥蔚, 李文亚, 仵鑫, 杨夏炜, 徐雅欣, 马铁军
3	发明专利	真空多室表面活化辅助连接复合装备	中国	ZL201510403314.0	2018 年 3 月 16 日	2846974	哈尔滨工业大学 (威海)	宋晓国, 刘洪伟, 曹健, 冯吉才, 付伟, 张特
4	发明专利	一种 Al_2O_3 陶瓷与瓷封合金的封接方法	中国	ZL201510414250.4	2018 年 5 月 25 日	2938124	哈尔滨工业大学 (威海)	宋晓国, 付伟, 李玉涛, 刘永江, 胡胜鹏, 冯吉才
5	发明专利	一种采用 TiZrNiCu+B 复合钎料连接 Ti60 与 TiB _w /TC4 的方法	中国	ZL201610092721.9	2018 年 4 月 10 日	2878930	哈尔滨工业大学 (威海)	宋晓国, 张特, 付伟, 刘多, 胡胜鹏, 曹健

6	发明专利	一种 AlMgB ₁₄ -TiB ₂ 复合陶瓷与 TiAl 基合金的真空钎焊方法	中国	ZL202010619204.9	2020 年 6 月 30 日	3032369	哈尔滨工业大学 (威海)	胡胜鹏, 雷煜, 宋晓国, 付伟, 杨泰利, 罗云, 孟庆森, 王国栋
7	发明专利	异种金属材料蜂窝夹层结构及其制备方法	中国	ZL202110253131.0	2022 年 12 月 6 日	5630289	哈尔滨工业大学 (威海)	宋晓国, 罗云, 李子寒, 李函霖, 周文龙, 胡胜鹏
8	发明专利	基于中间层及磁场辅助的 DD10 单晶高温合金连接方法	中国	ZL202510766539.6	2025 年 8 月 5 日	8134498	西北工业大学	郭伟, 丁鑫磊, 董佳鹏, 信敬如, 樊佩陇
9	发明专利	单晶高温合金 DD10 钎焊用钴基钎料及其制备方法与钎焊方法	中国	ZL202511461886.4	2025 年 12 月 23 日	8596195	西北工业大学	郭伟, 李欣荣, 梅寒
10	发明专利	一种钛酸锶陶瓷低温钎焊连接方法	中国	ZL202411798690.X	2025 年 9 月 26 日	8309653	西北工业大学	郭伟, 樊佩陇, 信敬如, 丁鑫磊

七、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
陈海燕	1	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	该项目总负责人，负责总体技术路线设计、关键技术攻关、成果集成及应用推广。提出了异质钎焊构型化复合钎料设计思想，发明了陶瓷基复材/镍基高温合金夹芯钎料制备技术，对第 1 项技术发明做出贡献；提出了界面反应路径调控方法，对第 2 项技术发明做出贡献；构建了多工序协同精密钎焊总体技术体系，对第 3 项技术发明做出贡献。支撑材料：主要知识产权 1-2, 科技奖励(其他附件 2.13、2.16)
付伟	2	无	教授	哈尔滨工业大学 (威海)	哈尔滨工业大学 (威海)	发明了面向陶瓷、石墨等低活性材料的活性复合钎料及低温连接方法，阐明了活性元素在固液界面的润湿、扩散和反应行为，对第 1、2 项技术发明做出贡献；研发了能场辅助界面调控及精密钎焊工艺，参与多工序协同连接技术开发，对第 3 项技术发明做出贡献。支撑材料：主要知识产权 3-6, 科技奖励(其他附件 2.15)
王鹏程	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	发明了钎料功能组元和颗粒增强构型化复合钎料，提出了功能组元表面阻挡层调控方法，实现了钎料热膨胀特性、界面反应和接头残余应力协同控制，对第 1 项技术发明做出贡献。支撑材料：主要知识产权 1, 科技奖励(其他附件 2.13)
宋晓国	4	院长	教授	哈尔滨工业大学 (威海)	哈尔滨工业大学 (威海)	发明了陶瓷、石墨及金属间化合物用系列复合钎料和连接方法，对第 1 项技术发明做出贡献；研发了

						超声辅助、真空复合精密钎焊技术及装备，对第 3 项技术发明做出贡献。支撑材料：主要知识产权 3-7，科技奖励（其他附件 2.14）
郭伟	5	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	建立了异质材料钎焊温度场、应力场和界面反应过程的数值分析方法，阐明了钎料构型、热循环及材料物性差异对界面应力和构件变形的影响规律，为界面反应路径及工艺窗口确定提供了理论依据，对第 2 项技术发明做出贡献。支撑材料：主要知识产权 8-10，科技奖励（其他附件 2.16）
潘兆义	6	车间主任	研究员	西安航天发动机有限公司	西安航天发动机有限公司	负责该项目技术在液体火箭发动机异质材料热端构件中的工程验证与型号应用，提出了大型铜/钢/钛流道构件钎料预置、精密装配、热循环和变形协同控制方法，参与专用工艺及装备工程化，对第 3 项技术发明做出贡献。支撑材料：科技奖励（其他附件 2.13）

八、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	项目第一完成单位，负责项目总体构思、技术路线设计、关键技术攻关、成果集成与组织实施。（1）提出异质钎焊界面构型化设计思想，发明了构型化复合钎料设计与制备技术，突破均质钎料成分功能单一、界面反应与残余应力难以兼顾的技术瓶颈，实现钎料组元、空间构型与界面功能的协同设计。（2）揭示异质钎焊多组元、多相界面反应与组织演化规律，发明了界面冶金反应路径选择性调控技术，实现脆性反应相生成、界面元素迁移和接头残余应力的协同控制。（3）建立异质材料多工序协同精密钎焊方法，完成关键工艺、专用工装及质量控制技术集成，推动项目成果在陶瓷/金属、复材/金属及金属/金属等典型异质构件中的应用。相关成果构成项目第 1、2、3 项技术发明的核心理论和技术基础。
哈尔滨工业大学 （威海）	2	项目主要完成单位，负责活性复合钎料、界面活化调控、能场辅助精密钎焊及专用装备研发。（1）发明了面向陶瓷、石墨等难润湿材料的活性复合钎料及界面反应调控方法，实现界面反应层连续性及组织均匀性的有效控制。（2）发明了激光表面活化、反应金属化和超声能场辅助界面调控技术，建立活化状态、元素扩散与冶金反应路径之间的关联，解决异质材料连接中界面润湿困难、脆性反应相易连续生长等问题。（3）研制了表面活化、超声辅助及真空封接等多工序协同精密钎焊装备，形成材料表面处理、界面活化、真空钎焊和过程调控相衔接的工艺装备体系。相关成果对项目第 1、2、3 项技术发明均作出了重要贡献。
西安航天发动机 有限公司	3	项目主要完成单位和工程应用单位，负责提出液体火箭发动机异质材料构件的工程需求，开展工艺适配、装备应用、产品试制、可靠性考核及型号验证。 （1）针对液体火箭发动机热端构件材料体系复杂、流道结构精密、钎焊面积大及服役条件苛刻等特点，参与建立大尺寸热力组件界面调控与多工序协同精密钎焊技术方案。（2）开展钎料装配、温度场控制、加压约束、变形控制及焊后质量评价等关键工艺研究，推动构型化复合钎料和界面冶金反应路径调控技术向复杂构件制造转化。（3）完成相关技术在大尺寸热力组件中的工程验证和型号应用，满足设计与服役要求。相关成果为项目第 2、3 项技术发明的工程成熟度、应用可靠性及推广价值提供了重要支撑。

九、完成人合作关系说明

本人陈海燕为该项目第一完成人。项目研究工作涉及西北工业大学、哈尔滨工业大学（威海）和西安航天发动机有限公司三家单位。项目组围绕构型化复合钎料设计与制备、界面冶金反应路径选择性调控以及多工序协同精密钎焊技术及装备，建立了长期稳定的产学研合作关系，形成了基础研究、技术攻关、装备研制与工程应用相互衔接的合作体系。

本人陈海燕（第一完成人）与王鹏程（第三完成人）长期开展构型化复合钎料及异质界面反应调控研究，共同发表 SCI 论文 23 篇，共同申请发明专利 1 件。本人还与宋晓国（第四完成人）、郭伟（第五完成人）围绕异质材料钎焊界面组织、残余应力及工艺调控共同发表 SCI 论文合计 5 篇；与潘兆义（第六完成人）围绕液体火箭发动机异质材料构件精密钎焊及工程应用开展合作研究，共同发表 SCI 论文 11 篇。本人同宋晓国、王鹏程、潘兆义共同完成相关科研成果，获得 2025 年度中国材料研究学会科学技术奖一等奖 1 项，形成了从理论研究、关键技术到工程验证的持续合作关系。

付伟（第二完成人）与宋晓国（第四完成人）长期合作开展活性复合钎料、陶瓷及石墨界面反应调控和能场辅助精密钎焊研究，共同承担相关科研项目，发表多篇 SCI 论文，共同申请发明专利 7 件。二人共同完成的相关技术成果获得 2025 年度中国有色金属工业科学技术奖一等奖 1 项，建立了稳定的科研项目、知识产权和成果转化合作关系。

王鹏程（第三完成人）与宋晓国（第四完成人）、潘兆义（第六完成人）围绕液体火箭发动机热端异质材料构件的界面调控、精密钎焊及服役可靠性开展合作，共同发表相关研究论文 9 篇，并推动项目技术在大尺寸铜/钢/钛推力室流道构件中的工程验证和型号应用。

上述合作关系均有共同发表的论文、共同申请的发明专利、共同承担的科研项目、共同获得的科技奖励及应用证明等材料支撑。六位完成人在长期合作基础上形成了分工明确、优势互补的研究团队，共同完成了该项目三项技术发明及其工程应用。

第一完成人签名：

完成人合作关系情况汇总表

序号	合作方式	合作者/项目排名	合作时间	合作成果	证明材料
1	共同知识产权	陈海燕（1）、王鹏程（3）	2025 年 9 月 23 日	一种钎焊陶瓷基复材与镍基高温合金的夹芯钎料制备方法	必备附件 1.1
2	共同知识产权	付伟（2）、宋晓国（4）	2018 年 3 月 16 日	真空多室表面活化辅助连接复合装备	必备附件 1.3
3	共同获奖	陈海燕（1）、王鹏程（3）、宋晓国（4）、潘兆义（6）	2025 年 6 月	共同完成“异质钎焊一体化界面构型驱动的组织调控与裂纹自愈合机制”成果，获 2025 年度中国材料研究学会科学技术奖一等奖。	其他附件 2.13
4	共同获奖	付伟（2）、宋晓国（4）	2025 年 12 月 25 日	共同完成“表面活化辅助异质金属高精密高可靠钎焊关键技术及应用”成果，获 2025 年度中国有色金属工业科学技术奖一等奖。	其他附件 2.14、2.15
5	共同获奖	陈海燕（1）、郭伟（5）	2023 年 6 月	共同完成“新型固态相变钎料与精密焊接理论及其应用基础研究”，获 2023 年中国材料研究学会科学技术奖二等奖。	其他附件 2.16

承诺：本人作为项目第一完成人，对本项目完成人合作关系及上述内容的真实性负责，特此声明。

第一完成人签名：