

2026 年度拟题名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

氢及其同位素分离纯化用净化器技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科学技术厅

提名意见：

可控核聚变能和氢能作为战略新兴产业，其核心原料氢及同位素氙的分离纯化是基础保障。该项目是由西北有色金属研究院联合中国船舶集团公司第七一二研究所针对上述重大需求，历经多年技术攻关，在钯合金高质量熔炼铸锭、低漏率焊接密封、高效率器件设计及工程应用等方面取得的系统性创新成果。项目采用高真空电弧熔炼+悬浮熔炼铸锭技术，实现了钯合金薄壁长毛细管高质量稳定批量制备，解决了薄壁管材加工易开裂、难钎焊等工艺技术难题；攻克了高密度、多管束钯合金管与不锈钢法兰真空钎焊技术，焊点整体漏率优于 $5 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ；创新设计了环形微通道氢流场结构，单件分离器单次循环氢或氙回收率达 95.6% 以上、处理量达 $2 \text{ m}^3/\text{h}$ 。项目整体技术达到国内领先、国际先进水平。项目获授权发明专利 4 项，发表学术论文 4 篇。项目成果自 2020 年起在可控核聚变堆用氙的分离及船用燃料电池高纯氢纯化两大领域实现工程应用，应用时间超过两年，累计新增销售额 3000 余万元、新增毛利 1000 余万元。项目相关技术支撑了多项国家级重大科研任务，对推动我国可控核聚变及氢能产业发展发挥了重要作用。经审查，项目成果资料齐全规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

氢能作为战略性新兴产业，高纯氢气制备与氢同位素分离技术是制约燃料电池发展和核聚变能源利用的关键瓶颈。钯合金膜扩散法利用钯合金材料独有的氢气选择透过性，具有装置结构紧凑、操作方便、所得氢气纯度可达 99.99999% 以上（7N~8N）等特点。是实现氢及同位素高效纯化及定向除杂的有效途径。本项目针对船用燃料电池高纯氢气纯化及核聚变堆氢同位素纯化分离的迫切需求，由西北有色金属研究院联合中国船舶集团公司第七一二研究所，围绕抗脆性钯合金膜材料优选研制、高效率纯化分离器设计制造及工程应用开展联合攻关，攻克了超薄壁钯钼合金毛细管批量制备、高密度多管束钯合金管真空钎焊、环形微通道分离器结构设计等关键技术难题，形成了具有自主知识产权的核心技术体系。

1. 主要技术内容

（1）抗脆性钯合金膜材料的优选与批量制备技术。在 T-Pd92Y、T-Pd72AgAuY、T-Pd75Ag 和 T-Pd73.7AgAuNi 四种合金体系基础上，系统研究了

不同成分、不同壁厚（0.08mm、0.06mm、0.05mm）钯合金管材的抗压强度、泄漏率和透氢性能。结果表明，T-Pd92Y 合金的透氢率显著优于其它合金，比商用钯银合金相比透氢率提高 2~2.5 倍。同时合金抗 CO、CO₂、CH₄ 等杂质气体毒化性能优良。在制备工艺方面，采用真空感应熔炼+真空自耗电弧熔炼双联熔炼工艺控制铸锭成分均匀性，通过挤压或旋锻开坯、多道次轧制和小加工率拉拔等工艺，实现了超薄壁钯合金毛细管的批量制备。

（2）高密度多管束钯合金管真空钎焊技术。针对Φ2×0.08mm 薄壁钯合金管与不锈钢法兰的异种材料焊接难题，通过对比 Ag、AgCu28、AgCuPd27-5 三种钎焊料的润湿铺展性能和溶蚀性能，优选出 AgCuPd27-5 钎焊料，确定了 820~830℃、保温 5~10min 的最佳钎焊工艺参数。单个钎焊接头经氦质谱检漏，泄漏率优于 $1.0 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ，攻克了高密度管束（单台最多 125 根以上）可靠钎焊的技术难题。

（3）环形微通道高效分离器结构设计及集成技术。采用模拟仿真软件对净化器结构参数进行模拟研究，参照国外先进产品结构形式，创新设计了环形微通道透氢流场结构。通过对比外压式和微通道两种结构方案的透氢性能，证实微通道结构净化器气体流速分布均匀，能更充分地利用每一根膜管进行渗氢反应，氢气透过效率显著提高（ $\eta \geq 95.6\%$ ）。在此基础上完成了处理量 2 m³/净化器正式样机的设计加工，核心元件规格为Φ60mm×600mm。

2. 授权专利情况

本项目已获授权和申请发明专利多项，主要包括：一种钯合金薄壁管钎焊封口的方法（ZL202010579891.6）、一种致密钯膜与多孔金属材料的复合方法（ZL202310602570.7）、一种超高纯氢分离器（ZL201710919965.4）、一种钯/钯合金膜纯化器及其使用方法发明（ZL202011063225.3）等。西北有色金属研究院，中国船舶集团公司第七一二研究所在氢及其同位素分离膜及器件开发领域已累计获授权发明专利 10 余件。相关专利涵盖了钯合金膜材料成分设计、超薄壁毛细管制备、真空钎焊工艺、分离器结构设计等核心技术环节，形成了完整的知识产权保护体系。

3. 技术经济指标

（1）透氢性能：T-Pd92Y 合金在 400℃、压差 0.4MPa 条件下，壁厚 0.08mm 管材透氢率达 35.12 ml/(min·cm²)，壁厚 0.05mm 管材透氢率达 50.13 ml/(min·cm²)，约为商用钯银合金的 2~2.5 倍。

（2）分离器性能：在温度 400℃、原料侧压力 $\geq 0.4\text{MPa}$ 、渗透侧压力 $\leq 0.1\text{MPa}$ 条件下，分离器处理量 $\geq 2 \text{ m}^3/\text{h}$ ，单次循环回收效率 $\geq 95.6\%$ 。

（3）产品纯度：经纯化后的氢气纯度稳定达到 99.99999%以上（7N）。

（4）可靠性与密封性：分离器抗压强度 $\geq 1.0\text{MPa}$ ，整体泄漏率 $\leq 5 \times 10^{-10} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

（5）核心元件尺寸：单一分离器核心元件外观尺寸Φ60mm×600mm，满足紧凑化设计要求。

4. 应用推广及效益情况

本项目技术成果自 2020 年 1 月起在中国船舶集团公司第七一二研究所，中国工程物理研究院材料研究所，中核四 0 四有限公司，中国原子能院等单位正式投入应用，应用时间超过 5 年，满足“整体技术已实施应用二年以上”的申报要求。

(1) 在船用燃料电池高纯氢气纯化领域的应用。中船 712 所将本项目研制的抗脆性钯合金膜管及 6KW、8KW、15KW 等系列规格氢气纯化器集成于船用燃料电池发动机及密闭空间燃料电池发电系统等产品中，开展了针对重整原料气中多种杂质的定向消除技术研究，建立了杂质定向消除试验评价方法，验证并优化了净化器与燃料电池系统的匹配性。截至 2024 年 7 月，累计交付应用本项目技术的相关产品 6 台套，新增销售额 500 余万元，新增利润 100 余万元。

(2) 在核聚变堆氢同位素纯化分离领域的应用。中物院材料所，中核四 0 四有限公司等单位将本项目研制的钯合金膜管、钯管渗透器组件（66 套）、钯合金螺旋管、钯膜组件及大尺寸钯合金扩散器组件等核心部件应用于聚变堆氘氚燃料循环系统中氢同位素（氘、氚）的纯化与分离，系统研究了杂质气体、浓度差、温度、压力等参数对分离效率及循环回收可靠稳定性的影响，为我国聚变工程实验堆（CFETR）氚工厂系统的建设提供了关键技术支撑。

(3) 社会效益。本项目技术成果支撑了多项国家级重大科研任务，推动了我国钯合金膜材料及氢同位素分离纯化技术达到国内领先、国际先进水平。项目执行期间培养了一批专业技术人才，有效促进了相关学科建设和产业技术进步，对保障国家能源安全和提升国防能力具有重大战略意义。

本项目整体技术于 2020 年 1 月起在多家应用单位正式投入实际应用，截至申报时已稳定运行满 5 年，技术成熟可靠，经济社会效益显著。

四、客观评价

1. 与国内外同类技术比较

钯合金膜扩散法是目前唯一能够稳定获得纯度 $\geq 99.99999\%$ （7N 级）超高纯氢气的膜分离技术。与变压吸附（产品气纯度通常为 99.999%）、低温精馏（能耗高、设备投资大）等方法相比，钯膜分离法具有装置结构紧凑、操作简便、纯度极高的显著优势。

在材料层面，国内外对 Pd-Ag、Pd-Cu、Pd-Y 等二元及三元合金开展了大量研究。其中 Pd-Ag 合金（PdAg23）的透氢速率比纯钯提高约 70%，而含 Y 6%~10% 的 Pd-Y 合金透氢速率比 Pd-Ag 合金还要高出 2 倍以上。本项目选用的 T-Pd92Y（PdY8at%）合金在 400℃、压差 0.4MPa 条件下透氢率达 35.12 ml/(min·cm²)（壁厚 0.08mm），约为商用 Pd-Ag 合金的 2~2.5 倍，处于国际先进水平。在薄壁化方面，国外钯合金管材厚度通常为 80~100μm，本项目成功将钯钯合金管壁厚减薄至 50μm 并实现批量制备。

在分离器层面，美国 Power Energy 公司开发的微通道结构分离器代表了国际先进水平。本项目参照该结构形式，独立完成了环形微通道流场设计，实现了单台处理量 2 m³/h、单次回收效率 $\geq 95.6\%$ 、产品气纯度 $\geq 99.99999\%$ 的技术指标。核心元件规格 $\Phi 60\text{mm} \times 600\text{mm}$ ，与国际同类产品相比处于同一技术水平。

2. 科技查新与检测报告

(1) 科技查新 经科技查新工作站查新，国内外未见有与本项目“抗脆性钯合金膜材料优选及批量制备—高密度多管束真空钎焊—环形微通道分离器集成”完整技术路线相同的公开文献报道，项目整体技术具有新颖性。

(2) 权威检测报告 经有关专业材料测试分析中心检测，本项目研制的钯合金管材抗压强度 $\geq 0.8\text{MPa}$ 、氦漏率 $\leq 1 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。分离器成品经氦质谱检漏，整体漏率 $\leq 5.0 \times 10^{-10} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。产品气纯度经气相色谱仪检测，达到 99.99999%以上。

(3) 验收意见 本项目相关研究成果已通过陕西省重点研发计划(工业领域)项目“核聚变氢同位素分离纯化用钯合金材料及应用技术(项目编号: 2020ZDLGY12-04)的课题验收，验收委员会专家组认为: 项目开展了高透氢率钯合金材料的设计及管材制备技术研究，设计出长径比 >10 (10~30)，微通道间隙为 $300\mu\text{m}$ ，排列间距为 1~2mm 的内通道结构分离器，减少了浓差极化现象对分离效率影响，形成了钯管分离纯化模块批量生成能力。制备了钯管分离纯化模块组件，为 CFETR 系统的可靠运行提供技术支持。

3. 国内外学术评价

钯及其合金膜对氢气具有极高的选择渗透性，在催化膜反应及氢分离与纯化方面已引起广泛研究。氢气在钯膜中的渗透传递遵循溶解-扩散机理，驱动力为膜两侧氢气的分压差。相关研究表明，原料气中的 CO 、 CO_2 等杂质气体会在钯膜表面产生竞争性吸附和浓差极化效应，降低透氢性能。本项目系统研究了上述多因素协同作用下钯合金膜透氢率的变化规律，为分离器工程化设计提供了理论依据。

本项目已在《贵金属》、《金属加工(热加工)》等核心期刊发表学术论文多篇，包括《钯合金膜激光密封焊接工艺研究》、《钯合金阵列管束气密性焊接工艺方法研究》和《钯钯合金净化器的透氢性能研究》等。

4. 国内其它应用单位学术评价

本项目研制的 Pd-Y 合金膜及系列化纯化分离器，获得了中核四〇四有限公司和中国原子能科学研究院的应用验证与学术认可。

中核四〇四有限公司以本项目研制的钯钯合金(Pd-8at%Y)为核心材料，系统研究了其抗毒化及透氢性能。结果表明: Pd-8at%Y 膜透氢速率随氢压增大而上升，压差 80 kPa 时达 $1.54 \text{m}^3/\text{h}$; 450°C 为其适宜工作温度。在氢氦分离方面，经循环分离处理后，氢气中氢气含量和氦气中氦气含量均低至 0.1%。相关成果发表于《贵金属》2026 年第 1 期。

中国原子能科学研究院基于本项目研制的直管外压式 PdY 扩散器，研究了低氢压($\leq 50 \text{kPa}$)条件下 PdY 合金膜的氢渗透性能。结果表明: 压力指数 $n=0.9$ ，渗透活化能约为 24.54kJ/mol 。相关成果发表于《核化学与放射化学》2021 年第 43 卷第 3 期。

上述第三方研究验证了本项目 Pd-Y 合金膜材料及分离器技术在透氢速率、

分离效率等方面的先进性与可靠性。

5. 科技奖励

西北有色金属研究院在氢同位素分离膜及器件开发领域曾获多项省部级科技奖励。本项目相关前期成果“螺旋状钯-钼合金管研制”、“螺旋状钯-钼合金管的工程化研制”等项目曾获多项省部级科技进步二等级以上奖励。

6. 知识产权状况

本项目已形成完整的知识产权保护体系，获授权发明专利多项，主要包括：一种钯合金薄壁管钎焊封口的方 法（ZL202010579891.6）、一种致密钯膜与多孔金属材料的复合方法（ZL202310602570.7）、一种超高纯氢分离器（ZL201710919965.4）、一种钯/钯合金膜纯化器及其使用方法发明（ZL202011063225.3）等。西北有色金属研究院以及合作应用单位在相关领域累计获授权发明专利 10 余件。

7. 应用效益评价

本项目技术成果自 2020 年 1 月起在中国船舶集团公司第七一二研究所、中国工程物理研究院材料研究所、中核四 0 四有限公司等单位正式投入工程应用，截至申报时已稳定运行满 5 年。累计交付应用本项目技术的相关产品约 100 台套，新增销售额 3000 余万元，新增毛利润 1000 余万元。中物院材料所，中核四 0 四厂等单位将本项目核心部件应用于聚变堆氦气燃料循环系统，为我国聚变工程实验堆（CFETR）氦工厂系统建设提供了关键技术支撑。

五、应用情况

本项目针对高纯氢气及氢同位素纯化分离的迫切需求，成功研制出抗脆性钯合金膜材料及系列化纯化分离器产品。项目成果已在船用燃料电池高纯氢气纯化和核聚变堆氢同位素纯化分离两大领域实现工程应用，核心应用单位为中国船舶集团公司第七一二研究所（以下简称“712 所”）和中国工程物理研究院材料研究所（以下简称“中物院材料所”）。具体应用情况如下：

1.在船用燃料电池高纯氢气纯化领域的应用

712 所作为国内舰船电力推进系统和化学电源专业研究所，长期深耕氢能与燃料电池领域。自 2020 年 1 月起，712 所将本项目研制的抗脆性钯合金膜管及系列化氢气纯化器集成于船用燃料电池发动机及密闭空间燃料电池发电系统等产品中。本项目产品在 300~500℃工作条件下实现高纯氢的提取与分离，纯化器管束布置紧凑、抗震性好，纯化效率高、纯氢产量大，产品气纯度稳定达到 99.99999%以上，有效满足了船用燃料电池对超高纯氢气的严苛要求。712 所应用本项目 6KW、8KW、15KW 等系列规格纯化器，开展了针对重整原料气中多种杂质的定向消除技术研究，建立了杂质定向消除试验评价方法，系统研究了原料气组成、压力、流量、杂质含量等因素对净化装置纯化效率的影响规律，验证并优化了净化器与燃料电池系统的匹配性与兼容性。截至 2024 年 7 月，712 所累计交付应用本项目技术的相关产品 6 套（台），新增销售额 500 余万元，新增利润 100 余万元。



纯化器配合燃料电池系统的测试现场

2.在核聚变堆氢同位素纯化分离领域的应用

钯及其合金膜由于其优良的选择性透氢性能，是国际热核聚变实验堆（ITER）和中国聚变工程试验堆（CFETR）氘氚燃料循环系统中优选的氢同位素分离纯化方法。中物院材料所氘氚燃料循环工程技术研究中心是面向氘氚燃料循环技术的工程应用和产业化而设立的工程技术研究机构。自 2020 年 1 月起，中物院材料所将本项目研制的钯合金膜管及纯化分离器集成于聚变堆氘氚燃料循环系统中，针对聚变燃烧室排出的等离子体灰中氢同位素（氘、氚）的提取回收需求，系统研究了杂质气体种类及含量、浓度差、温度、压力等工艺参数对分离效率及循环回收可靠稳定性的影响规律，建立了氢同位素纯化分离工艺包。经实际运行验证，应用本项目技术后氢同位素（氘、氚）的分离纯化效率显著提升，氚气纯度稳定达到 99.99999% 以上。本项目为中物院材料所，中核四 0 四有限公司，中国原子能院等单位提供了钯管渗透器组件、钯合金螺旋管、钯膜组件及大尺寸钯合金扩散器组件等核心部件共计 100 余套，合同金额合金 2000 余万元，支撑了聚变堆氘氚燃料循环演示实验系统的设计、建造与运行，为我国聚变工程实验堆（CFETR）氚工厂系统的建设提供了关键技术支撑。

应用概况

本项目技术整体于 2020 年 1 月起正式投入实际应用，截至申报时已稳定运行满 5 年，满足“整体技术已实施应用二年以上（2024 年 8 月 1 日之前应用）”的硬性要求。项目成果在船用燃料电池和核聚变能源两大国家战略领域实现了工程化应用，产生了显著的经济效益和重大的社会与国防战略效益。

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	中国工程物理研究院材料研究所	抗脆性钯合金膜材料、钯合金膜管、钯管渗透器组件、钯合金螺旋管、钯膜组件、大尺寸钯合金扩	应用于聚变堆氘氚燃料循环系统中氢同位素（氘、氚）的纯化与分离，累计提供钯管渗透器组件及相关组件	2020 年 1 月-2025 年 12 月	冯兴文 16659609521

		散器组件	80 余套		
2	中国船舶集团公司第七一二研究所	抗脆性钯合金膜材料、钯合金膜管、系列化氢气纯化器设计及制造技术	应用于船用燃料电池发动机及密闭空间燃料电池发电系统等产品中，累计交付产品 6 套	2020 年 1 月 -2024 年 12 月	张浩 13679168873
3	中核四〇四有限公司	钯合金膜管、钯膜组件、钯合金扩散器装置	氢同位素的纯化与分离，累计提供钯管渗透器组件及相关组件 8 套	2020 年 1 月 -2024 年 12 月	祝杰 0937-6762510
4	中国原子能院	钯合金膜管、钯膜组件	氢及同位素的纯化与分离，累计提供钯管及钯组件 10 余套	2020 年 1 月 -2025 年 12 月	连旭东 18500676267
5	成都国光电器股份有限公司	钯合金膜管、钯膜组件、钯合金净化器，钯合金螺旋管	氙的提取，累计提供钯管渗透器组件及相关组件 10 余套	2020 年 1 月 -2024 年 12 月	任超 13156239039

六、主要知识产权和标准规范等目录（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	一种超高纯氢分离器	中国	ZL201710919965.4	2020.4.24	3769215	西北有色金属研究院	操齐高、张科、刘啸锋、郑晶、贾志华、李银娥
2	发明专利	一种钼合金薄壁管钎焊封口的的方法	中国	ZL202010579891.6	2022.3.2	5034348	西北有色金属研究院	贾志华、操齐高、 郑晶、王轶、姜婷、李银娥
3	发明专利	一种致密钼膜与多孔金属材料的复合方法	中国	ZL202310602570.7	2025.10.17	8361003	西北有色金属研究院	贾志华、王轶、婷、郑晶、操齐高、张文强 、杨阳
4	发明专利	一种钼/钼合金膜纯化器及其使用方法	中国	ZL202011063225.3	2022.5.31	5198837	中国船舶集团公司第七一二研究所	吴飞、胡梅、彭元亨、李海港、张浩
5	论文	钼钼合金净化器的透氢性能研究	中国	2019, 40(S1):16-19	2019.11	《贵金属》	西北有色金属研究院	贾志华、王轶、姜婷、郑晶
6	论文	钼合金膜激光密封焊接工艺研究	中国	2022, 43(S1):1-4	2023.01	《贵金属》	西北有色金属研究院	贾志华，王轶，郑晶，操齐高，姜婷
8	论文	钼含量对银铜钼合金箔带钎料性能的影响	中国	2023 ,50 (24) : 41-43	2023.12	《广东化工》	西北有色金属研究院	戎万，操齐高，郑晶，汪小钰，贾志华
9	论文	钼合金阵列管束气密性焊接工艺方法研究	中国	2024（07）： 34-37	2024. 07	《金属加工（热加工）》	西北有色金属研究院	贾志华，郑晶，操齐高，姜婷，孟晗琪
10	行业标准	氢气净化用钼合金管材	中国	YS/T 416-2025	2025	中华人民共和国工业和信息化部	西北有色金属研究院	郑晶、贾志华、孟晗琪、姜婷、操齐高、王轶

七、主要完成人情况

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
操齐高	1	所长	正高级工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	全面负责项目总体设计、技术路线制定与组织实施，对本项目主要科技创新做出如下贡献： （1）针对创新点 1，提出钪钼合金膜材料成分优化方案；主持制定双联熔炼及超薄壁毛细管拉拔工艺，解决薄壁管材加工开裂、脱芯等核心难题。（2）针对创新点 2，主导攻克薄壁钪合金管与不锈钢法兰异种材料焊接难题。（3）针对创新点 3，提出环形微通道透氢流场设计方案，主持完成仿真模拟计算及结构参数优化，主导研制处理量 2 m³/h 分离器正式样机。 本人主要负责材料研制与分离器设计核心技术攻关，与合作单位完成人共同完成工程验证与应用推广。
郑晶	2	处长	正高级工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	主要负责合金成分优选、熔铸及分离器结构设计，对本项目主要科技创新做出如下贡献： （1）针对创新点 1（抗脆性钪合金膜材料体系优选及超薄壁毛细管批量制备技术），负责 i 四种合金体系的熔铸工艺研究与成分优化，主导完成了真空感应熔炼+真空自耗电弧熔炼双联熔炼工艺参数优化，解决了铸锭成分偏析与气孔控制难题。（2）针对创新点 3（环形微通道高效氢同位素分离器结构设计及集成技术），负责分离器结构方案设计与优化，完成了外压式与微通道两种结构方案的对比分析与参数设计，确定了环形微通道透氢流场结构及管束排列方式。 本人与项目负责人共同完成合金成分优选方向确定及分离器整体方案设计
贾志华	3	/	正高级工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	主要负责分离器设计图纸绘制及器件加工，对本项目主要科技创新做出如下贡献： （1）针对创新点 3（环形微通道高效氢同位素分离器结构设计及集成技术），负责分离器具体结构工程图纸绘制工作，主持完成了处理量 1 m³/h 验证样品及 2 m³/h 正式样机的全部工程图纸绘制与器件加工。本人独立于合作者的贡献体现在具体结

						构尺寸确定、工程图纸绘制及加工工艺实施。(2) 针对创新点 2 (高密度多管束钎合金管与不锈钢法兰真空钎焊技术), 参与了钎焊工装设计与器件装配工艺制定, 负责钎合金管束与法兰组件的精密装配及加工质量控制。 本人与项目负责人共同完成分离器整体方案设计。
姜婷	4	/	高级工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	主要负责合金熔铸与管材加工, 对本项目主要科技创新做出如下贡献: (1) 针对创新点 1 (抗脆性钎合金膜材料体系优选及超薄壁毛细管批量制备技术), 负责四种合金体系的熔铸工艺实施与管材加工, 完成了真空感应熔炼+真空自耗电弧熔炼双联熔炼工艺的参数优化与铸锭制备, 解决了钎钎合金铸锭成分偏析与气孔控制难题; 负责超薄壁毛细管拉拔工艺的具体实施, 采用旋锻开坯、多道次轧制和小加工率拉拔相结合的工艺路线, 完成了壁厚 0.05~0.08mm 钎钎合金毛细管的批量加工。 本人与完成人 2 共同完成合金熔铸工艺方案制定, 独立承担管材加工与质量控制工作。
胡梅	5	处长	研究员	中国船舶集团第七一二研究所	中国船舶集团第七一二研究所	参与分离器结构设计、三维建模、力学仿真及性能检测, 对本项目主要科技创新做出如下贡献: (1) 针对创新点 3 (环形微通道高效氢同位素分离器结构与集成技术), 负责分离器三维实体建模与结构优化设计, 完成了外压式与微通道两种结构方案的力学仿真分析与对比验证; 参与完成了处理量 1 m³/h 验证样品及 2 m³/h 正式样机的结构与性能检测工作。本人独立于合作者的贡献体现在三维建模、力学仿真分析及结构优化计算。 本人与完成人 1 共同完成分离器结构设计, 独立承担三维建模与力学仿真工作。
王轶	6	/	高级工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	主要负责焊料优选和钎合金组件钎焊工艺, 对本项目主要科技创新做出如下贡献: (1) 针对创新点 2 (高密度多管束钎合金管与不锈钢法兰真空钎焊技术), 负责钎焊料优选与钎焊工艺研究。通过系统对比试验, 优选出 AgCuPd27-5 钎焊料; 确定了钎焊温度 820~830℃、保温时间 5~10min、真空度<2×10⁻²Pa 的最佳工艺参数。本人独立贡献为钎焊料筛选试验方案设计与工艺参数优化。(2) 针对创新点 3 (环

						形微通道高效氢同位素分离器结构与集成技术)，负责钼合金管束组件与法兰的真空钎焊工艺实施及工装设计。
孟晗琪	7	/	高级工程师	西北有色金属研究院	西北有色金属研究院	主要负责钼合金材料性能测试及净化器性能检测，对本项目主要科技创新做出如下贡献： （1）针对创新点 1（抗脆性钼合金膜材料体系优选及超薄壁毛细管批量制备技术），负责四种钼合金体系的透氢性能、抗压强度及泄漏率测试。本人独立贡献为测试方案设计与数据分析处理。（2）针对创新点 3（环形微通道高效氢同位素分离器结构与集成技术），负责分离器整机透氢性能与分离效率检测，完成了外压式与微通道两种结构方案的氢渗透性能对比验证。本人独立于合作者的贡献体现在性能测试体系的建立与检测结果分析。本人与项目负责人共同确定测试方案，独立承担材料与整机性能检测工作。
张浩	8	/	工程师	中国船舶集团第七一二研究所	中国船舶集团第七一二研究所	参与完成分离器整机性能检测，对本项目主要科技创新做出如下贡献： 针对创新点 3（环形微通道高效氢同位素分离器结构与集成技术），负责分离器整机透氢性能与分离效率的系统检测工作。系统考察了操作温度、原料气压力及杂质气体等因素对分离器透氢速率和分离效率的影响规律。通过试验验证了环形微通道结构分离器在纯氢条件下及含杂质气体（CO、CO₂等）条件下的透氢性能，证实了微通道结构分离器氢气透过效率显著优于外压式结构（$\eta \geq 95.6\%$）。本人独立于合作者的贡献体现在整机性能检测方案设计、试验实施及数据分析处理。本人与完成人 6 共同完成分离器性能检测工作，独立承担整机系统级性能测试与评价。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

单位名称	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献 (限 600 字)
西北有色金属研究院	1	西北有色金属研究院作为本项目第一完成单位，全面负责总体设计、技术攻关与组织实施，在抗脆性钯合金膜材料优选、超薄壁毛细管批量制备、高密度多管束真空钎焊及环形微通道分离器设计集成等方面做出核心贡献。是国内唯一突破钯钌合金分离纯化器工程化研制技术的单位，整体水平处于国际先进地位。 1. 技术创新贡献 (1) 钯合金膜材料优选与批量制备。系统研究了四种合金体系合金性能，优选出透氢率最优的 T-Pd92Y8 合金（约是商用钯银合金的 2~2.5 倍）。突破了超薄壁（0.05~0.08mm）钯钌合金毛细管批量制备技术，解决了铸锭成分偏析与气孔控制、薄壁管材拉拔开裂与脱芯困难等工艺难题。(2) 高密度多管束真空钎焊技术。攻克了 $\Phi 2\times 0.08\text{mm}$ 薄壁钯合金管与不锈钢法兰异种材料焊接难题，优选出 AgCuPd27-5 钎焊料并确定最佳工艺参数，钎焊接头泄漏率优于 $5.0\times 10^{-11}\text{ Pa}\cdot\text{m}^3/$。(3) 环形微通道分离器结构设计及集成技术。采用仿真模拟优化结构参数，创新设计环形微通道透氢流场结构，改善了浓差极化效应对纯化性能的影响。研制出处理量 $2\text{ m}^3/\text{h}$ 分离器样机，单次循环回收效率$\geq 95.6\%$，产品气纯度$\geq 99.99999\%$。 2. 应用推广贡献 将技术成果推广至燃料电池和核工业领域，支撑多项国家级重大科研任务。项目执行期间，获授权发明专利 3 件，发表学术论文 4 篇，制修订国家行业标准 1 项。
中国船舶集团有限公司第七一二研究所	2	中国船舶集团公司第七一二研究所作为本项目的主要合作单位，在创新点 3（环形微通道高效氢同位素分离器结构设计及集成技术）中做出了重要贡献。 一、技术创新贡献 (1) 船用燃料电池氢气纯化系统集成技术。将西北有色金属研究院研制的抗脆性钯合金膜管及系列化氢气纯化器（6KW、8KW、15KW 等规格）集成于船用燃料电池发动机及密闭空间燃料电池发电系统等产品中，开展了高振动、高湿度海洋环境下纯化器与燃料电池系统的匹配性与兼容性研究。解决了纯化器在船舶复杂工况条件下的系统集成难题，验证了纯化器与燃料电池系统的匹配性。(2) 重整原料气杂质定向消除技术。针对船用燃料电池原料气中 CO、CO₂、CH₄、H₂O 等多种杂质，开展了定向消除技术研究，建立了杂质定向消除试验评价方法，系统研究了原料气组成、压力、流量、杂质含量等因素对净化装置纯化效率的影响规律，为纯化器在船用燃料电池领域的工程化应用提供了关键技术支撑。 2. 应用推广贡献 作为本项目技术的主要应用单位，自 2020 年 1 月起将项目技术成果应用于船用燃料电池发动机及密闭空间燃料电池发电系统产品中。有力推动了我国船用氢燃料电池动力系统的自主可控与工程化应用。

九、完成人合作关系说明

操齐高作为项目第一完成人，就本项目各位完成人之间的合作关系说明如下：本项目由西北有色金属研究院、中国船舶集团公司第七一二研究所共同完成，围绕氢及同位素净化用钽合金材料及纯化分离器的设计、研制与工程应用开展联合攻关。各完成人之间通过共同立项、产业合作等方式建立了实质性合作关系。

本人与郑晶（排名第2）、贾志华（排名第3）、姜婷（排名第4）王轶（排名第6）、孟晗琪（排名第7）同属西北有色金属研究院项目核心团队。其中，郑晶负责抗脆性钽膜材料成分设计与成膜工艺研究，姜婷负责合金熔铸与管材加工工艺研究，贾志华负责分离器结构设计图纸绘制和制造加工。本人作为项目负责人，全面负责项目总体方案设计与组织实施，与上述完成人在材料研制、器件加工等方面紧密配合，共同完成了钽合金膜材料体系优选及超薄壁毛细管批量制备技术攻关。本人与郑晶（排名第2）、贾志华（排名第3）在分离器结构与加工制造方面开展合作，共同完成了环形微通道分离器结构与器件加工。本人与王轶（排名第6）开展合作，共同完成了焊料优选、钎焊工艺优化与组件集成等工作。本人与孟晗琪（排名第7）在器件性能检测方面开展合作，共同完成了钽合金膜材料及纯化器整机性能检测等工作。上述完成人之间通过定期技术讨论、联合实验等方式协同攻关，共同推动了项目技术的突破。

1. 与中国船舶集团公司第七一二研究所的合作关系

2019年至2020年，双方共同承担了装备预先研究（共用技术）项目（项目编号：41421020501），围绕船用燃料电池高纯氢气纯化技术开展联合攻关，由西北有色金属研究院负责抗脆性钽膜材料的优选研制及纯化器设计加工，712所负责纯化器与燃料电池系统的集成验证。2021年至2024年，双方继续深化合作，共同承担了“173计划项目（基础加强）”，进一步开展了钽合金材料及纯化器在船用燃料电池领域的工程化应用研究。合作期间，西北有色金属研究院向712所胡梅（排名第5）、张浩（排名第8）提供了6KW、8KW、15KW等系列规格纯化器6套用于系统验证。通过上述合作，双方建立了从材料研制、器件设计到系统集成的完整技术链条。

2. 其他完成人之间的合作关系

项目团队内部各完成人之间保持了密切的协作关系。西北有色金属研究院的操齐高、贾志华、在纯化器结构与加工制造过程中，与中船712所的胡梅、张浩双方在材料—器件一体化研制过程中紧密配合。712所的胡梅、张浩负责对纯化器与燃料电池系统的集成匹配与验证，上述完成人之间通过定期技术交流、联合实验等方式协同攻关，共同推动了项目技术从材料研制到工程应用的全链条突破。

3. 合作成果

通过上述合作，项目团队共同取得了以下主要成果：

共同承担装备预先研究（共用技术）项目（项目编号41421020501）、“173计划项目（基础加强）”等科研项目；实现了钽合金材料及纯化分离器在船用燃

料电池高纯氢气纯化领域的工程应用。

本人承诺以上内容真实有效。