

## 科学技术进步奖公示内容

一、项目名称：时效强化型 Cu-Ni-Si(Al)合金的研制与应用推广

二、提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名单位：陕西省教育厅

**提名意见：**针对国家集成电路产业发展对引线框架材料的战略需求和卡脖子难题，本成果依托国家级和省级科技项目，经 13 余年产学研用协同攻关，探索了 Cu-Ni-Si(Al)合金组织调控与性能优化的关键技术，在技术创新与应用推广层面形成系统性成果。

在技术创新层面，厘清了合金“成分-加工工艺-组织-性能”的关键关联问题，创新性地开发直接粉末轧制工艺下合金板材快速短流程制备技术，成果理论水平高、创新性强、技术先进，构建了高水平技术成果体系，授权发明专利 2 项、发表学术论文 30 余篇，相关成果获陕西省高校科技成果二等奖。经专家鉴定，其技术创新性、指标先进程度、成果重现性与成熟度均表现突出，为 Cu-Ni-Si(Al)合金应用领域提供了关键技术支撑。

在应用推广层面，研制的系列 Cu-Ni-Si(Al)合金在黄河光伏科技股份有限公司和华天科技（宝鸡）有限公司进行了试应用，有效解决了企业对关键材料的迫切需求。项目成果覆盖节能、环保、装备制造及新材料等战略领域，深度契合国家发展循环经济、绿色制造与“双碳”政策导向，不仅具备广阔应用前景与推广价值，更能从产业链上游推动新材料领域技术进步与产业升级。

该项目成果材料齐全规范，无知识产权纠纷与人员排序争议，完

全符合陕西省科学技术奖提名条件，为彰显其在技术落地与产业赋能中的重要价值，特提名为陕西省科学技术进步奖三等。

### 三、 项目简介：

随着集成电路向高功率、多引脚和小型化的方向发展，铜及铜合金的低强度成为制约其应用的关键指标。尽管不同的强化方式都以牺牲导电性为代价，但比较而言时效强化对导电性的损伤最小，成为提高铜合金强度的主流手段。在国家自然科学基金和陕西省自然科学基金、工业攻关以及国际合作等项目的支持下，经过十余年的攻关，先后解决了三元相图缺失导致成分设计和组织调控缺乏依据、强度和导电性协调匹配的内在机制两个关键基础问题，通过热处理和热机械处理结合实现了 **Cu-Ni-Si** 合金匹配调控了强度和导电性，探索了合金薄板的短流程高效率制备工艺，并开发了具有重要应用潜力的新型 **Cu-Ni-Al** 合金。

主要科学发现和技术要点如下：

(1) 系统研究并提出了 **Cu-Ni-Si** 合金的凝固模型，结合热力学计算揭示了合金的固态相变机制，解决了三元相图缺失导致成分设计和组织调控缺乏理论依据的关键基础问题。

平衡相图是材料成分设计和组织调控的重要依据，然而缺乏完整的 **Cu-Ni-Si** 三元平衡相图。为此，本成果首先提出在高温烧结炉中进行缓冷以实现近平衡凝固，提出 **Cu-Ni-Si** 合金的凝固模式模型，并通过等温水淬实验验证了模型的可靠性；通过热分析结合动力学计算，揭示固态相变过程不同阶段的动力学机制。科学价值：明确了宽

Ni、Si 成分范围内合金的组织形成规律，是本成果研究的重要理论成果之一。

(2) 深入研究了热处理和热机械处理对 **Cu-Ni-Si** 合金强度和导电性的影响规律，揭示了合金的强化和导电机制，使得协调解决强度和导电性的矛盾属性成为可能。

沉淀相在热处理过程中的析出是协调时效强化型合金综合性能的关键。本成果通过热处理和热机械处理改变合金中 Ni、Si 原子的存在形式，系统分析 Ni、Si 原子的存在形式对合金强度和导电性能的影响，建立 **Cu-Ni-Si** 合金的导电模型并阐明了强化机理。科学价值：掌握了强度和导电性协调匹配的关键，指导了 **Cu-Ni-Si** 合金的工艺参数制定，实现了高强度和良好导电性的匹配。

(3) 建立了 **Cu-Ni-Si** 合金的热变形本构方程，阐明了动态再结晶的临界条件与机制，为铸态合金的热加工提供了工艺窗口。

铸态 **Cu-Ni-Si** 合金中晶界上脆性相  $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$  的连续网状结构，既显著影响力学和导电性能，又易导致热加工开裂，要想通过热加工实现成形性，必须获得热加工图并揭示动态再结晶机制。为此，本成果基于 Arrhenius 本构模型、动态材料模型和 Prasad 失稳准则，计算并绘制了热加工图；基于  $-\partial\theta/\partial\sigma$ - $\sigma$  曲线的最小值判据和 Zener-Hollomon 参数温度补偿因子，建立了合金的动态再结晶晶粒生长模型。

(4) 可视化 **Cu-Ni-Si** 合金粉末在直接轧制过程中的变形行为，阐明了生坯烧结制备过程的组织演化机制，探索出合金薄板短流程高效

率制备的新工艺。

传统的合金薄板需要经历铸造、开坯锻造、多道次和退火、精整等工艺，生产周期长且成本较高。为此，本成果提出对 **Cu-Ni-Si** 单质粉末体系直接轧制+烧结的短流程高效率粉末冶金制备新工艺。采用计算机数值模拟建立单质粉末体系的直接轧制模型，考察工艺参数对变形行为和生坯质量的影响规律；采用静态水淬法，研究生坯在烧结过程中的原位反应行为，探讨不同区域 **Ni-Si** 相的竞争反应机制，最终形成了一套完成的短流程粉末冶金薄板技术原型。

**(5) 基于 Cu-Ni-Si 合金体系组织演化和性能调控机制的研究结果，探索了新型 Cu-Ni-Al 合金兼具高强度和良好导电性匹配的可行性。**

合金元素从铜基体以沉淀相形式析出，是制备高强度和良好导电性铜合金的必要条件，尽管 **Cu-Ni-Al** 合金具有优异的耐腐蚀性，但 **Cu-Ni-Al** 三元相图 500°C 等温截面表明富铜端为单相固溶区，被认为不具备高强高导潜质。本成果对位于单相固溶区的合金进行热处理，确定了成分与相结构，阐明影响沉淀相析出的关键因素，从而将 **Cu-Ni-Al** 合金纳入高强高导铜合金序列。

本成果技术内容中“高 **Ni**、**Si** 含量的 **Cu-Ni-Si** 合金的制备方法”和“一种带有同步快速水淬功能的高温原位电阻测量仪的测量方法”分别获授权国家发明专利；发表论文 30 篇，其中 **SCI** 收录 20 篇，单篇最高引用 58 次。本项目先后获得 2 个国家自然科学基金以及 4 个省部级自然科学基金、工业攻关和国际合作项目的支持。国内外同行高度

肯定本成果的研究贡献，论文被国内外多篇关于高 Ni\Si 含量、超高强度 Cu-Ni-Si 合金的研究报道多次引用。

#### 四、 客观评价：

##### (1) 项目验收结题及成果应用情况

本项目成果依托国家自然科学基金面上项目《Cu-Ni-Si 合金薄板的直接粉末轧制及其强度与导电性匹配的调控机制》（51871173）、《Cu-Ni-Al 合金中沉淀相的析出调控及其对载流摩擦磨损特性的影响》（51875453）；陕西省自然科学基金基础研究计划项目《Cu-Ni-Al 三元相图富铜端沉淀相析出的可行性与析出机制》（2013JQ6006）、《Cu-Ni-Si 合金中强化相析出过程的原位研究与调控》（2014JM2-5042）等项目凝练而成，项目评价结果均为“优”、“良”。其中陕西省科技计划项目“粉末轧制法低成本制备引线框架用 Cu-Ni-Si 合金薄板研究（项目编号：2017KW-021）”，专家在验收意见时评价：在掌握低成本制备 Cu-Ni-Si 合金薄板的粉末轧制技术的基础上，实现对 Cu-Ni-Si 合金薄板强度和导电性的调控，并积极探索其作为集成电路引线框架材料的工程化应用和市场前景完成了研究内容，达到了预期研究目标。本项目研制的 Cu-Ni-Si 合金在西安黄河光伏科技股份有限公司和华天科技（宝鸡）有限公司的产品及封装工艺上进行了试用，用户进行了积极反馈。本项目探索出的粉末直接成型工艺进行了推广，与杭州华光焊接新材料股份有限公司签订了真空用薄带材直接制环技术开发协议。

##### (2) 获奖及学术引用情况

2025 年 7 月,《时效强化型 Cu-Ni-Si(Al)合金的研制与组织性能调控机制研究》获陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖。项目成果获得国内外学者大量的引用。Jarosław Konieczny 等人在“Thermal Analysis and Selected Properties of CuNi<sub>2</sub>Si Alloy Used for Railway Traction”文章中两次引用了成果论文“Microstructure and solidification behavior of Cu-Ni-Si alloys”,一是印证了成果中时效 1h 后的放热峰对应于固态/固态转变的结论,二是印证了成果中非固态/液态转变和最后一个吸热峰值(1076-1081°C)的温度与纯铜的熔点有关; Changsheng Wang 等人在“Simultaneous enhancement of mechanical and electrical properties of Cu-Ni-Si alloys via thermo-mechanical process”文章中引用了成果论文“Effect of Ni/Si mass ratio on microstructure and properties of Cu-Ni-Si alloy”,肯定了通过调整 Cu-Ni-Si 合金中 Ni 和 Si 的比例来控制合金中沉淀的类型和形态,从而提高 Cu-Ni-Si 合金的综合力学导电性能的研究工作; Jiwang Zhang 等人在“Effect of micro-shot peening on fatigue properties of precipitate strengthened Cu-Ni-Si alloy in air and in salt atmosphere”文章中引用了成果论文“Abnormal improvement on electrical conductivity of Cu-Ni-Si alloys resulting from semi-solid isothermal treatment”,肯定了开发的 Cu-Ni-Si 合金以及半固体处理后,具有良好的强度和导电性组成; Zhuan Zhao 等人在“Co effects on Cu-Ni-Si alloys microstructure and physical properties”文章中引用了成果论文“Microstructure and selection of grain boundary phase of Cu-Ni-Si ternary alloys”,在成果的启示下,利

用冷变形导致的晶体缺陷，例如合金中的空位和位错，提高晶格畸变能量，并增加沉淀相的量，从而提高合金的导电性的结论，论证了在给定的时效时间，轧制会导致更高的导电率。

## 五、 应用情况：

项目理论及技术成果先后应用于材料领域多个企业。2016 年，黄河光伏科技股份有限公司制造二部，将本成果研究开发的高强度高导 Cu-Ni-Si 合金薄带在光伏配套电路元件上进行了试用，结果表明，Cu-Ni-Si 合金薄带具有高的强度和导电性能，在施焊过程中焊锡在 Cu-Ni-Si 合金焊带表面的铺展性好，利于工人操作。

2022 年 3-6 月，华天科技（宝鸡）有限公司在集成电路 MCU 封装引线框架 LQFP80L~128L 研发项目中，采用市场主流引线框架材料和本成果研发的时效强化型 Cu-Ni-Si 合金薄带进行了封装性测试，结果表明成果研制的 Cu-Ni-Si 合金薄带在封装过程中表现出与现有材料同样优异的封装特性。作为一种具有应用潜力的引线框架材料，既验证了本成果研发的封装工艺高的材料适用性，也为该新型 Cu-Ni-Si 合金薄带用于集成电路引线框架领域储备了必要的实践基础。

2021 年，依托本项目粉末直接轧制成形工艺研究成果的基础之上，与杭州华光焊接新材料股份有限公司签订了“真空用合金薄带材直接制环技术开发”协议，完成了金属带材成环工艺参数模拟和专用成型工艺制定，开发了专用生产设备。

## 六、 主要知识产权和标准规范等目录：

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	SCI 论文	Microstructure and solidification behavior of Cu-Ni-Si alloys	中国	2009, 60(2): 114-118	2009-01-01	Materials Characterization	西安理工大学	谢辉；贾磊；吕振林
2	SCI 论文	Netted structure of grain boundary phases and its influence on electrical conductivity of Cu-Ni-Si system alloys	中国	2012, 28(2): 243-248	2012-02-01	Materials Science and Technology	西安理工大学	贾磊；谢辉；吕振林；王晓；王思明
3	SCI 论文	Hot deformation behavior of Cu-Ni-Si alloy at elevated temperature	中国	2019, 6(8): 086590	2019-05-24	Materials Research Express	西安理工大学；西安航空学院	张金龙；吕振林；贾磊；谢辉；陶世平；魏鑫；马莹
4	SCI 论文	Simulation on the Direct Powder Rolling Process of Cu Powder by Drucker-Prager/Cap Model and Its Experimental Verification	中国	2022, 12 (7) : 1145-1145	2022-07-05	Metals	西安理工大学；西安航空学院	张晨；贾磊；谢辉；牛瑞峰；吕振林
5	SCI 论文	Characterizations on Precipitations in the Cu-Rich Corner of Cu-Ni-Al	中国	2023, 13 (2) : 274-274	2023-02-04	Crystals	西安理工大学；西安航空学院	周永欣；郑晨阳；陈剑坤；陈阿敏；贾磊；谢辉；吕振林



		Ternary Phase Diagram						
6	发明专利	高 Ni、Si 含量的 Cu-Ni-Si 合金的制备方法	中国	ZL201010529411.1	2013-01-02	1112529	西安理工大学	谢辉；贾磊；吕振林；王晓
7	发明专利	一种带有同步快速水淬功能的高温原位电阻测量仪的测量方法	中国	ZL201510187729.9	2017-12-22	2747440	西安航空学院	谢辉；马莹；张金龙；贾磊；张蓉；陶世平；吕振林；吴伟刚
8	SCI 论文	Effect of Cr <sub>2</sub> AlC content on the properties of a Cu-Cr <sub>2</sub> AlC composite	中国	2016, 6: 789-795	2016-05-09	Results in Physics	西安理工大学	王新生；吕振林；林高庭；贾磊；陈江先
9	SCI 论文	Abnormal improvement on electrical conductivity of Cu-Ni-Si alloys resulting from semi-solid isothermal treatment	中国	2012, 77: 107-109	2012-03-09	Materials Letters	西安理工大学	贾磊；林鑫；谢辉；吕振林；王晓
10	SCI 论文	Preparation of Cu/CrB <sub>2</sub> composites with well-balanced mechanical properties and electrical conductivity by ex-situ powder metallurgy	中国	2022, 17: 1605-1615	2022-01-01	Journal of Materials Research and Technology	西安理工大学；西安航空学院；陆军装甲兵学院	郭新风；贾磊；吕振林；邢志国；谢辉

承诺：上述知识产权无争议且为本项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年其他省部级（政府）科学技术奖励项目和本年度其他陕西省科学技术奖提名项目中作为支撑材料出现。用于提名陕西省科学技术奖的情况，已征得未列入项目主要完成人和主要完成单位的权利人（专利指发明人）的同意，有关知情证明材料均存档备查。

## 七、 主要完成人情况：

主要完成人：（依次列写完成人姓名）

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	谢辉	教授	教务处处长	西安航空学院	西安航空学院	（1）对第 1、2、3、4、5 项科技创新做出了创造性贡献；（2）于 2007 年起在合作单位（西安理工大学）工作期间，受 Ni-Si 系深过冷组织调控启发，提出了时效强化型高 Ni、Si 含量的 Cu-Ni-Si 合金研究工作，并在调入第一完成单位（西安航空学院）继续开展相关研究；（3）是代表作第 1、2、3、4、5、6、7、9、10 的作者。
2	贾磊	教授	无	西安理工大学	西安理工大学	（1）对第 1、2、3、4、5 项科技创新做出了创造性贡献；（2）于 2008 年起在第一完成人谢辉和第四完成人吕振林的共同指导下攻读硕士、博士学位，主要负责熔铸法制备 Cu-Ni-Si 合金的相变行为、热处理工艺以及性能调控工作。毕业后留校工作，开始探索 Cu-Ni-Al 合金的析出行为与表征、粉末冶金法制备 Cu-Ni-Si 合金等；（3）是代表作第 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 的作者。
3	陶世平	副教授	无	西安航空学院	西安航空学院	（1）对第 3、4 项科技创新做出了创造性贡献；（2）主要开展粉末冶金法制备 Cu-Ni-Si 合金相关研究；（3）是代表作第 2、5 的作者。
4	吕振林	教授	无	西安理工大学	西安理工大学	（1）对第 1、2、3、4 项科技创新做出了创造性贡献；（2）是成果研究工作的指导、组织和管理者；（3）是代表作第 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10 的作者。
5	张金龙	教授	无	西安航空学院	西安航空学院	（1）对第 3、4 项科技创新做出了创造性贡献；（2）主要完成了 Cu-Ni-Si 合金的热变形行为与析出调控、强度和导电性匹配调控研究；（3）是代表作第 2、5 的作者。

6	魏鑫	讲师	无	西安航空学院	西安航空学院	(1) 对第3项科技创新做出了创造性贡献；(2) 是成果第四完成人吕振林指导的硕士研究生，博士毕业入职（西安航空学院）后协助成果第一完成人谢辉开展 Cu-Ni-Si 合金相关研究工作；(3) 是代表作第5的作者。
7	周永欣	教授	无	西安理工大学	西安理工大学	(1) 对第5项科技创新做出了创造性贡献；(5) 主要完成了 Cu-Ni-Al 合金中沉淀相的析出调控及其对载流摩擦学特性的影响的研究；(3) 是代表作第10的作者。。

#### 八、 主要完成单位及创新推广贡献：

主要完成单位：（依次列写单位名称）

排名	完成单位	创新推广贡献
1	西安航空学院	1、指导与本项目相关的《Cu-Ni-Si 合金薄板的直接粉末轧制及其强度与导电性匹配的调控机制》国家自然科学基金和省部级基金的申报与执行，发明专利技术和论文发表等研发工作；2、投入资金建立了项目相关的科研团队和实验室；3、实施完成项目成果研发、技术集成、推广和示范应用工作。
2	西安理工大学	1、指导与本项目相关的《《Cu-Ni-Al 合金中沉淀相的析出调控及其对载流摩擦磨损特性的影响》》国家自然科学基金和省部级基金的申报与执行，与第一完成单位西安航空学院的项目合作、知识产权共享和论文合著等。2、实施完成项目成果研发、技术集成、推广和示范应用工作。

#### 九、 完成人合作关系说明：（合作方式包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等。

下表中的“项目排名”指在本次报奖中的完成人排序。）

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	合作起始时间	合作完成时间	合作成果名称
1	共同知识产权	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4	2009-02-01	2013-01-02	高 Ni、Si 含量的 Cu-Ni-Si 合金的制备方法
2	共同	谢辉/1	2009-0	2017-12-22	一种带有同步快速水淬功能的高温原位电阻测量仪的测

	知 识 产 权	贾磊/2 陶世平/3 吕振林/4 张金龙/5	2-01		量方法
3	论 文 合 著	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4	2009-0 2-01	2019-01-01	Microstructure and solidification behavior of Cu-Ni-Si alloys
4	论 文 合 著	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4	2009-0 2-01	2012-02-01	Netted structure of grain boundary phases and its influence on electrical conductivity of Cu–Ni–Si system alloys
5	论 文 合 著	谢辉/1 贾磊/2 陶世平/3 吕振林/4 张金龙/5 魏鑫/6	2009-0 2-01	2019-05-24	Hot defor mation behavior of Cu-Ni-Si alloy at elevated temperature
6	论 文 合 著	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4	2009-0 2-01	2022-07-05	Simulation on the Direct Powder Rolling Process of Cu Powder by Drucker–Prager/Cap Model and Its Experimental Verification
7	论 文 合 著	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4 周永欣/7	2009-0 2-01	2023-02-04	Characterizations on Precipitations in the Cu-Rich Corner of Cu-Ni-Al Ternary Phase Diagram
8	论 文 合 著	贾磊/2 吕振林/4	2009-0 2-01	2016-05-09	Effect of Cr <sub>2</sub> AlC content on the properties of a Cu-Cr <sub>2</sub> AlC composite

9	论文合著	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4	2009-02-01	2012-03-09	Abnormal improvement on electrical conductivity of Cu-Ni-Si alloys resulting from semi-solid isothermal treatment
10	论文合著	谢辉/1 贾磊/2 吕振林/4	2009-02-01	2020-01-01	Preparation of Cu/CrB <sub>2</sub> composites with well-balanced mechanical properties and electrical conductivity by ex-situ powder metallurgy

### 完成人合作关系说明

西安航空学院谢辉（第 1 完成人）、陶世平（第 3 完成人）、张金龙（第 5 完成人）、魏鑫（第 6 完成人）共同合作提出和验证了时效强化型 Cu-Ni-Si(Al)合金的综合性能的核心技术体系，其研究成果发表了多项发明专利与论文并获奖。

西安理工大学贾磊（第 2 完成人）、吕振林（第 4 完成人），周永欣（第 7 完成人），通过与西安航空学院科研项目研究和技术开发的方式，进行了长期紧密合作，并以协作开展调研等多种方式参与该成果的理论框架构建与研究内容开展，其研究成果发表了多项发明专利与论文并获奖。