

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

电子封装材料非线性本构模型及原位测试方法

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果针对我国在电子信息制造及航天器件领域亟需突破的高可靠芯片封装材料与结构力学建模难题，围绕复杂服役环境下封装材料的本构建模与力学性能评估开展了系统研究，有效支撑了芯片封装自主可控与高性能化发展。项目首创性提出了基于纳米压痕响应的本构参数反演算法，开发了热-力-电多物理场耦合下的本构建模方法，填补了传统方法难以同时考虑温度、电流和应变率等多因素协同影响的研究空白。突破了长期制约行业发展的“建模难、测量难、评估难”技术瓶颈，提出的高加速疲劳试验方法显著缩短了焊点热疲劳实验周期（缩短 90% 以上），大幅提升了电子产品研制效率。相关研究成果已获授权发明专利 5 项，计算机软件著作权 20 项，成功应用于华为创新研究计划、中国空间技术研究院等多家单位的封装材料性能测试、器件结构设计及寿命可靠性评估中，成果通过华为 TMG/CTMG 委员会的双轮验收并在多代产品中实际应用，取得了显著的工程转化效益。被提名人相关工作被世界顶级电力电子专家、欧洲及多个国家院士、国际协会会士等国际著名学者引用与验证，获得国际同行的高度评价，充分体现了成果的科学先进性和国际影响力。该成果具有原创性强、工程价值高、应用前景广的突出特点，为固体力学在电子封装行业的深入应用和我国相关核心技术的自主可控提供了有力支撑。成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。提名该项目为陕西省自然科学奖一等奖。

三、项目简介

高性能芯片是保障航天、航空等国家安全领域的关键基础，但我国芯片制造业长期面临“卡脖子”困境，尤其在 14nm 以下先进制程能力受限的背景下，难以满足高端芯片的自主需求。其中，7nm 以下先进制程的高性能计算芯片已成为第四次工业革命中的重大技术挑战，而受制于设备、材料、设计和工艺等多方面限制，我国芯片制造业短期内难以依循摩尔定律的持续微缩路线实现突破。基于我国芯片行业已掌握的 28nm 及以上成熟制程，发展先进封装技术成为实现芯片性能跨越式提升的重要途径，有望通过系统级异质集成使芯片整体性能提升 1-2 个数量级，从而有效突破制程推进放缓所带来的性能与成本瓶颈。然而，部分领域对高性能芯片的应用往往处于极端条件下，亟需建立更为科学且系统的芯片先进封装结构力学可靠性评估体系，以实现封装结构性能劣化与疲劳可靠性的高效评价。而其核心工作为封装材料的本构损伤模型和测试方法，正是最新国

际异质整合路线图（HIR）指出的行业基础科学难题。

围绕上述“卡脖子”瓶颈，该项目以揭示热-电-力多场耦合下封装材料变形机理和建立寿命预测理论为目标，在电子封装中发展和应用固体力学理论，提出封装材料本构与寿命的闭环式设计方法，系统开展了封装材料力学性能与细观形貌的关联与调控、多场耦合下本构模型与力学参数唯一性研究以及封装结构疲劳寿命评估的高加速实验与理论建模三方面工作，显著提升了芯片在极端工况下的长寿命与高可靠性，为我国高性能芯片先进封装的自主可控提供了坚实的理论支撑与技术保障。所取得研究成果的科学价值和创新性包括：

科学发现一：针对先进封装结构高度依赖材料力学性能，而锡基合金和烧结纳米颗粒等低熔点材料在服役过程中的组织演化复杂、力学参数离散性大、性能劣化规律难以准确评估等关键问题，该项目建立了封装材料力学性能与细观形貌的关联机制，研发了热-电-力耦合测试平台，结合断裂相场法与晶体塑性理论定量揭示细观特征对本构损伤响应的作用规律，实现跨尺度计算并阐明多物理场耦合下的损伤机制。同时，该项目提出了热处理调控方法，通过反向调控细观结构稳定材料性能，量化了热处理条件对合金与烧结颗粒变形机制的影响，并联合瑞典皇家工程科学院 Johan Liu 院士制备出热导率超 $200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的高性能纳米银材料，显著提升其热电导率与服役适应性。该研究不仅揭示了封装材料服役过程中的性能劣化机理，还解决了长期存在的参数离散性问题，实现了按照结构延寿需求对材料性能的可控优化，为航天领域宽禁带器件的高可靠封装提供了关键理论与方法支撑。

科学发现二：针对多场耦合条件下封装材料本构描述不足、参数精度与唯一性差，难以可靠评估复杂工况下性能的行业瓶颈，该项目建立了热-电-力耦合物理场下具有参数唯一性的本构模型，突破了传统方法缺失一致性的难题。研究发展了覆盖典型服役工况的统一蠕变塑性本构模型，修正双背应力塑性流动准则，实现了对温度（ $-50 \sim 150^\circ\text{C}$ ）、应变率（ $10^{-4} \sim 300/\text{s}$ ）和电流密度（ $0 \sim 2.55 \times 10^3 \text{ A}/\text{cm}^2$ ）的宽域条件下封装材料力学行为的准确描述，克服了行业常用 Anand 模型在低温下高估强度的缺陷，并在有限元模拟中实现了大尺度长时程下多场耦合响应的高效表征。同时，提出了基于纳米压痕响应曲线的本构参数反演算法，结合 Berkovich 压痕曲线、能量原理及有限元非线性拟合，成功解决了力学参数唯一性问题，并通过球形压头实验验证方法可靠性，能够同时揭示塑性与蠕变特性并准确确定弹性模量、硬度、应变率敏感指数等关键参数。该方法已应用于无铅焊料和烧结纳米银材料，并配套原位压痕仪实现了工程化应用，为复杂工况下电子封装结构的合理设计与可靠性评估提供了坚实的理论与方法支撑。

科学发现三：针对航天等领域对电子封装结构高可靠性的迫切需求，该项目突破了传统温度循环试验周期长、效率低的瓶颈，提出了不同尺度封装结构疲劳寿命的高加速实验与仿真方法。在焊点层面，建立了热-电-力耦合下的温度循环疲劳模型，考虑焦耳热效应改进 Coffin-Manson 寿命公式，揭示了材料抗疲劳性能差异，发现高屈服强度无铅焊料在热疲劳与高电流耦合下表现优异，可为

电子设计优化提供依据；在封装结构层面，发展了温度循环疲劳的高加速实验与理论方法，通过有限元与实验联合研究，调控材料与几何参数以满足寿命设计要求，并利用高温机械循环显著加速蠕变变形，使实验周期缩短 90%以上而仍保持寿命预测的高精度。该方法应用于华为创新研究计划，成功通过 TMG 和 CTMG 两轮严格验收，并在 QFN、WLCSP 等多类封装中推广；进一步支持了国内首次 30 吨级波导振动试验，确保了新型支架等先进结构的力学性能与服役寿命，直接服务于中国首颗超百 G 容量高通量卫星——中星 26 号的成功发射。研究成果形成了电子产品温度循环疲劳可靠性的高加速等效评估方法，为军民电子产品的快速研制和可靠性设计提供了关键支撑。

围绕先进封装材料力学与可靠性研究，该项目历时近十年，在机械、力学及微电子可靠性领域国际权威期刊发表 SCI 论文 115 篇，其中第一或通讯作者 84 篇（包括 ESI 全球 Top0.1% 热点论文 10 篇、Top1% 高被引论文 20 篇，中科院一区期刊 24 篇、二区期刊 14 篇），在 ICEPT、EPTC 国际电子封装会议及 EI 检索期刊发表论文 70 余篇，出版专著 2 部。项目第一完成人近五年在电子封装领域 5807 位学者中发文质量排名第 2、综合排名第 8（根据 ScholarGPS 数据），入选国家级青年人才计划、全球前 2% 顶尖科学家榜单、西安市“科学家+工程师”队伍建设项目首席科学家，当选 IAAM 会士及 IEEE 高级会员，获 IAAM 杰出科学家奖、获得中国发明协会发明创业奖成果奖二等奖（2025 年,R1）、陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖（2025 年,R1）和二等奖（2023 年,R1）、陕西高等学校科学技术奖一等奖（2017 年、2019 年,R3）等 30 余项学术奖励。研究成果已成功应用于中星 26 号超百 G 容量高通量卫星、中国航天科技集团、中国航天科工集团第一研究院、华为和中兴等单位，显著提升了电子产品力学可靠性与寿命评估水平。相关论文被美国西北大学、Sandia 国家实验室、荷兰代尔夫特理工大学、日本军事学院、德国柏林联合实验室、新加坡南洋理工大学、香港理工大学、北京大学等 80 余家学术机构引用超过 4200 次，包括世界顶级电力电子专家、欧洲及多个国家院士、国际协会会士等国际知名学者直接采用该项目所提出的仿真及测试方法并做出高度评价。此外，项目团队持续推进电子封装力学的深度应用、协同发展及影响范围，受邀担任 SCI 期刊 Comp Model Eng 副主编、J Polym Mater 副主编、Sci Rep 编委、Coatings 编委及 Int J AI Mater Des 编委。任国际会议主席 2 次、分会场主席及技术委员会成员 20 余次。

四、客观评价

科学发现 1 的代表性评价：

- 2023 年发表至今单篇引用 110 次的 ESI 高被引论文及热点论文[代表性论文 3] 基于晶体塑性理论建立了烧结银宏观细观变形关联机制，被欧洲科学与艺术院院士、成都大学校长王清远教授在机械领域一区 TOP 期刊 Int J Plasticity 论文[2024, 172:103857]引用，阐述了晶粒取向对滑移体系的活跃程度和疲劳损伤演化过程的重要影响意义。
- ESI 高被引论文[Inter J Solids Struct, 2023, 264:112098]所提出的具有普适性的

多孔异质细观结构建模及力学性能预测方法，被多个一区 TOP 期刊文章引用，涵盖材料包括不锈钢[J Mater Res Technol, 2023, 23:4148]、工业废料[Constr Build Mater, 2023, 400:132741]、复合材料[Carbohydr Polym, 2024, 326:121595; J Mater Res Technol, 2023, 24:8429]、岩石[Comput Geotech, 2024, 168:106145]、陶瓷[Ceram Int, 2023, 49:23358]。

- 洪堡学者、四川大学范海东教授在 **Int J Plasticity** 论文[2024,179,104046]引用本人三篇文章[代表性论文 3; 代表性论文 4; Fatigue Fract Eng Mater Struct, 46:1413]所提出的细观尺度晶体塑性损伤模型，构建了晶粒细观与宏观性能关联，解释了材料疲劳损伤行为。

- 国家领军人才、西南交通大学康国政团队在 **Int J Plasticity** 论文[2025,187,104270]引用本人两篇文章[代表性论文 3; 代表性论文 5]作为周期性边界条件研究的典型案例。

- ASM 太平洋科技有限公司半导体技术顾问 IEEE、ASME 及 IMAPS 会士 John H Lau 博士与原 Indium 公司技术副总裁、IEEE 会士、CPMT 杰出技术成就奖得主 Ning-Cheng Lee 博士的著作《Assembly and Reliability of Lead-Free Solder Joints》将本人所提出的多场耦合本构模型[AIP Adv, 2018, 8]作为典型热力场焊点寿命预测模型进行论述。

- 航天及军用封装材料宏细观力学性能实验及本构模型仿真研究成果已实现中国空间技术研究院（我国最主要空间技术及其产品研制基地）多个型号应用，为相关重要航天产品的预研做出了突出贡献，取得了可观的经济效益和社会效益（应用证明见附件 7-8）。

科学发现 2 的代表性评价：

- 世界顶级电力电子专家、IEEE Fellow、IEEE 电力电子学会主席、IEEE William E. Newell 电力电子奖、Frede Blaabjerg 教授发表论文[Sci Rep, 2020, 10:14821]系统地引用了本人 7 篇论文[Inter J Solids Struct, 2020, 191:351; Int J Mech Sci, 2020, 172:105416; Int J Mech Sci, 2019, 161:105020; Int J Mech Sci, 2018, 140:60; Microelectron Reliab, 2020, 107:113616]，并认为所提出的覆盖宽温度和应变率范围的本构模型是杰出的工作。

- 在力学领域期刊 **Mech Mater** 论文[代表性论文 6]提出了压痕应变率与单轴拉伸应变率的转化方法，为该期刊 2022 年唯一入选 ESI 高被引论文。此方法被多篇一区 TOP 期刊论文正面评述或直接采用，如美国金属学会会士、MSEA 副主编 RDK Misra 教授[Mater Sci Eng A, 2022, 831:142169]、荷兰工程院院士、代尔夫特理工大学 GQ Zhang 教授[J Mater Sci: Mater Electron, 2023,34:1692]、IEEE 会士、电子芯片集成及可靠性引领者 XJ Fan [J Mater Res Technol, 2023, 26:3183]；国家领军人才、湖南大学姜潮教授 [Mech Mater, 2021, 162:104053]；芬兰阿尔托大学 J Torabi 教授 [Mech Syst Signal Pr, 2023, 192:110224]等。

- 在固体力学领域期刊 **Inter J Solids Struct** 发表论文[2020, 191:351]，首次利用压痕方法反演烧结银本构性能，目前单篇引用 79 次。韩国首尔国立大学 HN Han

教授在力学领域一区 TOP 期刊 *Int J Plasticity* 论文[2022, 157:103403]将论文作为从局部压痕响应曲线分析宏观单轴拉伸行为的代表工作。香港理工大学 ZJ Zheng 教授在影响因子为 17.1 的一区 TOP 期刊 *ACS Nano* 论文[2023, 17:3921]直接利用本人提出的无量纲算法,通过压痕响应测量材料性能。此外,该论文被中国科学院院士魏悦广教授[*Acta Mech*, 2021, 232:1479]等国内外著名学者正面评述。

- 烧结银浆技术发明者、芯片封装无铅焊料方向国际著名专家、日本大阪大学 K Suganuma 教授在两篇 TOP 期刊论文[J Alloy Compd, 2020, 834:155173; *Mate Design*, 2022, 224:111389]中引用了本人所提出的建立微观形貌与本构行为之间关联的压痕方法。

- 美国物理学会会士、美国 Sandia 国家实验室资深研究员 A Talin 在影响因子为 9.5 的 TOP 期刊 *ACS Appl Mater Interfaces*[2023, 15:41598],根据本人所提出的压痕分析方法和主要结论,分析和讨论压痕测试数据,揭示了塑性区半径与界面粘结力的相关影响机理。

- 国家领军人才、天津大学徐连勇教授在中科院一区 TOP 期刊 *Mat Sci Eng A* 发表论文[2019, 761:138051],引用本人 4 篇论文[*Mat Sci Eng A*, 2019, 744:406; *Mat Sci Eng A*, 2017, 696:90; *Int J Appl Mech*, 2018, 10:1850110; *Micromachines*, 2018, 9:608],采用并验证了本人提出的压痕方法。

科学发现 3 的代表性评价:

- 美国加州大学圣迭戈分校讲席教授 JS Chen 在力学领域一区 TOP 期刊 *J Mech Phys Solids*[2021, 151:104385]发表论文,选取本人论文[代表性论文 7]为代表工作,论证目前较多采用数值仿真方法研究热疲劳,避免温度循环测试实验的高消耗。

- 欧洲科学院院士、欧洲科学与艺术学院院士 T Rabczuk 院士和汉诺威大学庄晓莹教授合作文章[*Eng Struct*, 2025, 326:119500]选取本人论文[*Microelectron Reliab*, 2022, 134:114553; *J Mater Sci*, 2020, 55:10811 等 4 篇文章],强调了弹塑性本构模型对电子封装结构力学响应及其可靠性分析准确性的重要意义。

- 在航天科学技术基金项目资助下,建立的典型封装材料本构模型有效预测复杂条件下 PBGA 封装结构热疲劳寿命,相关成果已被航天系统唯一的航天电子对抗总体所——中国航天科工集团 8511 研究所用于元器件封装结构优化设计和可靠性分析,有效提升了该所自主创新能力(应用证明见附件 7-2)。

- 受华为创新研究计划资助(附件 7-5),开展了 QFN 和 WLCSP 板级结构焊点寿命研究。提出了基于高温下机械循环的高加速评估方法,且利用所提出的封装材料多场耦合本构模型得到了循环载荷下封装结构的准确数值仿真。与传统温度循环相比,高加速温度循环疲劳寿命预测结果与寿命模型量化寿命偏差在 30% 以内,缩短测试时间达 90% 以上。项目成果通过了华为技术有限公司可靠性 TMG 和工艺 CTMG 委员会的两轮质量验收。

- 所开发的高加速寿命实验和仿真方法应用于中国首颗超百 G 容量高通量卫星

高密度系统级波导组件结构尺寸和焊接材料选用的优化分析和设计，开展了国内首次 30 吨级别波导振动试验，保障首次采用无法兰减高波导及新型支架等先进结构力学性能和服役寿命，支撑了中星 26 号卫星成功发射（评审证明见附件 7-7，应用证明见附件 7-9）。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

（按照表格所示栏目填写支撑本项目重要科学发现的代表性论文专著详细情况，不超过 8 篇，按重要程度排序。所列论文专著应公开发表 2 年以上即 2023 年 8 月 1 日以前公开发表。所列代表作及论文应以省内单位或个人为主要完成单位，署名第一单位（标号为 1 的单位）应为国内单位。

“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”、“第一作者（含共同第一作者）”和“国内作者”，均应基于论文的全部作者进行填写，不得只填写本项目完成人或少填漏填。

其中，“作者”、“通讯作者（含共同通讯作者）”和“第一作者（含共同第一作者）”的姓名表述应与论文原文的署名保持一致，“国内作者”填写作者的中文姓名。

该表所列论文专著的知识产权归国内所有且无争议，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年省部级（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作者的同意，其中，未列入项目主要完成人的第一作者、通讯作者（含共同第一作者、共同通讯作者）已出具知情同意书面签字意见，与其他作者的有关知情证明材料均存档备查。）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷页码（xx 年 xx 卷 xx 页）	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	电子封装材料力学性能:纳米压痕技术原理、应用和拓展	西北工业大学出版社	龙旭	ISBN:978-7-5612-	2022-08-01	龙旭	龙旭	龙旭	0	CNKI	是

2	电子封装力学	科学出版社	龙旭	ISBN:97 8703064 2479	2020- 01-01	龙旭	龙旭	龙旭	0	CNKI	是
3	Meso-scale low-cycle fatigue damage of polycrystalline nickel-based alloy by crystal plasticity finite element method	International Journal of Fatigue	X Long, KN Chong, YT Su, C Chang, LG Zhao	2023 年 175 卷 107778 页	2023- 06-21	X Long, YT Su	X Long	龙旭, 种凯楠, 苏昱太, 常超	110 (ESI)	Web of Science	是
4	Unveiling the damage evolution of SAC305 during fatigue by entropy generation	International Journal of Mechanical Sciences	X Long, Y Guo, YT Su, KS Siow, CT Chen	2023 年 244 卷 108087 页	2022- 12-29	X Long, YT Su	X Long	龙旭, 郭颖, 苏昱太, 陈传彤	80 (ESI)	Web of Science	是
5	Connecting the macroscopic and mesoscopic properties of sintered silver nanoparticles by crystal plasticity finite element method	Engineering Fracture Mechanics	X Long, KN Chong, YT Su, LM Du, GQ Zhang	2023 年 281 卷 109137 页	2023- 02-22	X Long, YT Su	X Long	龙旭, 种凯楠, 苏昱太, 杜雷鸣, 张国旗	140 (ESI)	Web of Science	是

6	Strain rate shift for constitutive behaviour of sintered silver nanoparticles under nanoindentation	Mechanics of Materials	X Long, QP Jia, ZY Shen, M Liu, C Guan	2021 年 158 卷 103881 页	2021-04-14	X Long, M Liu	X Long	龙旭, 贾啟普, 申子怡, 刘明, 官操	74 (ESI)	Web of Science	是
7	Thermal fatigue life of Sn-3.0 Ag-0.5 Cu solder joint under temperature cycling coupled with electric current	Journal of Materials Science: Materials in Electronics	X Long, YC Liu, FR Jia, YP Wu, YH Fu, C Zhou	2019 年 30 卷 7654-7664 页	2019-05-11	X Long	X Long	龙旭, 刘永超, 贾冯睿, 吴言沛, 付永辉, 周澄	19	Web of Science	是
合 计									423		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

（所列完成人应为在陕个人，或与在陕个人合作的我国其他地域的个人（**第一完成人必须为全职在陕的个人**），且是“代表性论文专著”主要学术思想的提出者，并在“代表性论文专著”中有署名。应按表格要求逐项填写。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。同一人同一年度只能作为一个提名项目的完成人参加陕西省科技奖的评审。附件所列验收、鉴定的专家组成员不能作为完成人。

工作单位：根据人事关系填写完成人现工作的单位，已退休的填写退休前的工作单位。

完成单位：填写完成人参与本项目主要研究工作时所在单位，应为国内法人单位。如涉及多个单位，应根据贡献大小填写一个单位。完成单位与奖励证书关联，请根据实际情况审慎填写。

对本项目贡献：不超过 300 字。应具体写明完成人对本项目做出的实质性贡献，并注明代表性论文专著编号。
填报时括号部分内容删除。）

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
龙旭	1	教授	教授	西北工业大学	西北工业大学	对研究成果 1, 2, 3 做出了原创性贡献，具体包括：1.建立了热电力耦合物理场下封装材料宏观本构模型，突破了传统本构模型无法描述各种服役工况下大范围温度、电流和应变率耦合特性的行业瓶颈；2.提出了封装材料细观异质结构建模方法及本构损伤模型，突破了面向大功率芯片极端服役环境下典型封装结构-烧结层-材料细观结构的跨尺度损伤传递瓶颈，形成了电子产品疲劳可靠性的高加速评估方法；3.研制了封装材料原位力学性能压痕仪，基于压痕响应提出了具有唯

						一性的封装材料本构参数反演算法。主要贡献证明材料附件编号：全部，其中 7-1 至 7-9 合作研究中负责了技术方案确定、理论和试验研究开展和文章撰写。
申子怡	2	无	无	西北工业大学	西北工业大学	对研究成果 2 做出了如下贡献：1.建立了典型封装材料的原位压痕测试方法及其本构参数反演理论，阐明了封装材料塑性区半径与压痕响应的关联机制；2.开展了电子封装力学性能测试方法的创新创业工作。主要贡献证明材料附件编号：1-6，6-5，6-6。
吴言沛	3	高级工程师	高级工程师	西安空间无线电技术研究所	西安空间无线电技术研究所	对研究成果 1，3 做出了如下贡献：1.验证了本项目所提出的热-电-力物理场耦合下封装材料本构模型对无铅焊料的适用性；2.验证了本项目所提出的疲劳寿命模型对无铅焊点热循环寿命的适用性，并通过调整材料力学参数优化了航天器件在轨寿命。主要贡献证明材料附件编号：1-7，6-5，6-6，6-8，7-8，7-9。
付永辉	4	高级工程师	高级工程师	西安空间无线电技术研究所	西安空间无线电技术研究所	对研究成果 1，3 做出了如下贡献：1.进行了几何参数影响焊点热疲劳寿命的仿真研究；2.参与无铅焊料热电性能参数试验研究。主要贡献证明材料附件编号：1-7，6-5，6-6，7-8，7-9。

七、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	西北工业大学为该项目第一完成单位，全面负责项目内容中所涉及的研究问题提出、研究方法、理论攻关、技术路线及方案制定、可行性研究等。成功揭示了在电子器件极端应用场景下多场耦合物理场中封装材料宏观本构模型及其力学参数的唯一性，突破了传统材料本构模型面向复杂服役工况的瓶颈问题。提出了一整套封装材料异质细观结构的建模方法，创新性地解决了多尺度损伤传递的技术难题，推动了航天领域电子器件封装材料疲劳可靠性评估的理论发展。西北工业大学为项目的顺利实施提供了充足的办公场所、试验设备及相关资金支持。
西安空间无线电技术研究所	2	西安空间无线电技术研究所为该项目第二完成单位，协助完成了项目内容中封装材料本构模型在无铅焊料及烧结纳米银的应用可靠性研究，并将本项目所提出的寿命模型用于航天设备关键大功率芯片封装结构的寿命预测。西安空间无线电技术研究所为项目的顺利实施提供了我国航天领域电子封装相关的关键技术需求，使本项目研究内容直接面向国家重大战略需求。

八、完成人合作关系说明

（应以第一完成人角度，介绍项目完成人之间的合作经历或合作关系，不局限于第一完成人与其他完成人的合作，也可以包括其他完成人之间的合作。）

（1）依托的平台、基地情况

本项目依托平台为“飞行器结构完整性技术工业和信息化部重点实验室”。重点实验室共包括研究人员及技术人员 91 人，研究人员包括教授/研究员/研究员级高级工程师 24 人。近 3 年，实验室（西工大大部分）承担各类科研项目 260 余项，合同经费超 3.7 亿元，包括 XX 重大专项、技术基础、国家自然科学基金及其他型号预研项目等横纵向课题。实验室开展了飞行器结构强度寿命可靠性、多学科设计优化先进试验技术与设施开发、新材料研发与应用等领域的研究工作，解决了 C919、C929、AG600、通航飞机、轻型运动飞机、J*飞机、Y*大型运输机、Y*中远程运输机、空天组合动力飞行器 WS 系列、WZ 系列、WJ 系列航空发动机、多型火箭发动机等多型重点型号的关键技术攻关与排故问题。研究工作先后获国家科技进步二等奖 1 项，省部级一、二等奖 10 项。实验室在近三年依次取得了中国合格评定国家认可委员

会（CNAS）认证和“国家航空航天和授信项目”（NADCAP）认证，是国内高校中规模最大的从事力学相关的基础科研、型号预研保障与人才培养的单位，集基础研究、高技术开发和重大工程项目于一体的教学、科研实体，具有很强的、经验丰富的科研成果转化能力，其研究水平在国内处于领先行列，在国际上具有较大影响力，为科学研究和人才培养提供充沛条件。

（2）建设创新团队与学术梯队、培养青年人才、创新团队文化情况

作为陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室骨干团队，开展了大量的有重要理论意义和工程应用价值的科研工作，组建了从事固体力学、微电子封装连接结构及材料学科的交叉研究创新团队，并于 2017 年初建立了“先进电子封装材料及结构研究中心”。研究中心瞄准新型电子封装材料及结构国际学术前沿，航空航天极端环境下电子器件封装技术的国家重大战略需求，开展多物理场耦合作用下封装材料及结构力学性能研究，解决复杂应用背景下电子器件封装可靠性问题。中心已具备试件处理、细观观测、力学性能测试和计算模拟的综合试验平台。引进瑞典皇家工程科学院院士 Johan Liu 作为顾问教授加入研究团队，与日本大阪大学产业科学研究所 K Suganuma 教授课题组、中国科学院力学研究所、中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心等国内外单位保持稳定的科研合作关系，形成了围绕电子封装结构力学可靠性的“新材料合成+力学性能测试+产品可靠性评估”的闭环协作模式。培养了一支技术过硬、作风优良的科研团队，团队青年教师包括省“三秦英才”优秀青年工程技术人才、“秦创原”引用高层次创新创业人才多名。通过培养和发掘科研实践过程学生创新能力，学生团队开发的“电子封装材料力学性能压痕仪”，荣获“互联网+”等省校级双创奖项 14 项，所指导中外学生荣获“优秀毕业生”12 人次。

围绕力学方法在电子封装核心问题的应用，与诸多国内重要研究所和公司保持稳定的科学研究和产品研发合作关系，多项研究成果已获得了实际应用，已授权发明专利 2 项和软件著作权 20 余项。完成华为创新研究计划“板级焊点的加速温度循环可靠性测试方法”，建立了无铅锡基合金焊点热疲劳可靠性高加速等效实验方法，热疲劳可靠性实验周期缩短 90%以上，通过了华为技术有限公司可靠性 TMG 和工艺 CTMG 委员会的两轮质量验收。验证了我国首颗高通量卫星舱上系统级波导组件新型焊接和支撑方式的力学可靠性，成功应用于中国首颗超百 G 容量的 Ka 频段高通量卫星——中星 26 号卫星。与北京航空航天大学可靠性工程研究所元器件质量保证中心合作，开展了烧结银材料力学性能与疲劳寿命的试验验证，用于典型关键大功率器件长期高可靠的应用场景。在科研攻坚过程中，把价值塑造贯穿学生社会责任感培养的全过程。创新团队已毕业硕博研究生广泛就业于中国电科、中航工业、华为和 vivo 等国有和民族企业。