

2026 年度陕西省技术发明奖公示信息

项目名称		耐热-蚀特种功能薄膜涂层抗剥落与可控制备技术							
提名者		陕西省知识产权局							
提名意见									
耐高温、高隔热、耐腐蚀等特殊功能薄膜涂层，是支撑航空、航天、航海、能源等重大领域的关键材料，热、腐蚀尤其两者耦合作用下薄膜涂层剥落是巨大瓶颈。项目二十多年来致力薄膜涂层抗热-蚀剥落与可控制备技术研究，取得了原理、方法、设备、标准与产业化的系统创新与突破。提出了薄膜涂层热-蚀耦合失效预测方法，建立了薄膜涂层抗剥落指标体系；基于指标体系发明了薄膜涂层微结构设计方法与自主可控工艺，提升热障涂层抗燃气冲击剥落能力 2 倍，研制的动力电源多层薄膜相比国际露铁率低 30%、耐蚀性高 1 倍；自主研制了原位补氧型电子束沉积、高速脉冲喷射电沉积等成套设备，形成我国热障涂层自主可控能力，建成动力电源薄膜公司并占领扣式电池领域国内 70%以上市场。 项目授权发明专利 64 项，制定了国家相关标准 11 项。整体技术应用于中国航发沈阳发动机研究所、四川燃气涡轮研究院等 16 个重点单位及其重点工程型号，推动热障涂层型号应用、延寿与稳定性提升等关键技术突破，解决了动力电源薄膜露铁、绿霉、掉粉等瓶颈实现产业化，近三年销售收入 5.7 亿元。培养第一完成人中国青年科技奖特别奖，第二完成人国家杰青、国家教学名师，推动学科获国家重点学科、国家级教学团队、国家级实验教学示范中心等。 我单位认真审阅了该项目提名书及附件材料，确认全部材料真实有效，并按照要求对该项目的基本情况进行了公示，公示期间无异议。 根据《陕西省科学技术厅关于 2026 年度省科学技术奖提名工作的通知》，参照技术发明奖评定条件和评定标准，提名该项目参评陕西省科学技术发明 一 等奖。									
主要完成人情况									
排名	姓名	技术职称	工作单位				完成单位		
1	杨丽	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
2	周益春	教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
3	潘俊安	教授	湘潭大学				湘潭大学		
4	刘俊凯	副教授	西安电子科技大学				西安电子科技大学		
5	潘勇	研究员	湖南永盛新材料股份有限公司				湖南永盛新材料股份有限公司		
主要完成单位									
排名	单位名称								
1	西安电子科技大学								
2	湘潭大学								
3	湖南永盛新材料股份有限公司								
主要知识产权和标准规范等目录									
序号	知识产权（标	知识产权（标准）具体名称	国家（地区）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	证书编号（标准批准	权利人（标准起草单位）	发明人（标准起草人）	发明专利（标准）

	准)类别					发布部门)			有效状态
1	发明专利	一种高速旋转涡轮叶片热障涂层的寿命预测方法及装置	中国	ZL202110351013.3	2024.1.30	第6660413号	西安电子科技大学	杨丽, 颜景军, 陈环宇, 刘志远, 周益春	有效
2	发明专利	一种应用于单晶镍基合金与表面热障涂层间的扩散屏蔽层及其制备方法	中国	ZL202211020243.2	2023.11.17	第6492663号	西安电子科技大学	刘俊凯, 周益春, 杨丽, 李聪, 程春玉, 孙宇, 李桂芳, 曹可	有效
3	发明专利	一种原位补氧型扫描电子束气相沉积(IOC-SEVD)装置及其方法	中国	ZL201810008839.8	2020.5.19	第3805117号	湘潭大学	杨丽, 周益春, 谢志航, 蔡书汉, 朱旺	有效
4	发明专利	Type of testing equipment for detecting the failure process of thermal barrier coating in a simulated working environment	美国	14/760,444	2018.4.10	US009939364B2	湘潭大学	周益春, 杨丽, 钟志春, 蔡灿英	有效
5	发明专利	一种考虑热力化耦合的高速旋转热障涂层可靠性评价方法	中国	ZL202410539392.2	2024.9.24	第7395629号	西安电子科技大学	杨丽, 闫维亮, 李聪, 周益春	有效
6	发明专利	一种涡轮叶片热障涂层全场力学性能分散性的表征方法	中国	ZL202510013367.5	2025.11.21	第8506840号	西安电子科技大学	杨丽, 严刚, 吴乔, 李聪, 周益春	有效
7	发明专利	一种热障涂层高温界面断裂韧性的原位表征方法	中国	ZL202411919297.1	2025.03.18	第7804171号	西安电子科技大学	杨丽, 严刚, 吴乔, 李聪, 周益春	有效
8	发明专利	应用于热障涂层的多层粘结层材料及其制备方法	中国	ZL202211004137.5	2024.1.19	第6632491号	西安电子科技大学	刘俊凯, 张思瑞, 杨丽, 周益春, 孙宇, 李桂芳, 曹可, 李聪	有效
9	发明专利	一种高倍率一次碱金属电池的制备方法	中国	ZL202011555032.X	2023.07.25	第6171125号	湘潭大学	潘俊安, 陈端伟, 谢淑红, 潘勇, 雷维新, 汪啸, 罗振亚	有效
10	发明专利	叶片夹持器及叶片涂覆方法	中国	ZL201810008862.7	2020.10.2	第4015609号	湘潭大学	杨丽, 蔡书汉, 周益春, 张亚, 朱旺	有效

客观评价

1. 国家计划项目验收结论书

(1) **国家863项目结题验收**: 2017年12月, 任务来源国家863项目“金属及金属基化合物层状结构功能化材料的研究和应用”, 通过了国家高新技术中心组织的结题验收。评价: “突破了多层镍表面复合与新工艺, 建成了最大宽幅为 1300mm 的不锈钢单面覆多层镍材料连续电沉积示范线, 实现了批量生产和销售。”

(2) **国家863项目结题验收**: 2006年2月, 任务来源国家863项目“覆镍深冲钢带产业化生产中的关键技术研究”, 通过了科学技术部国家863计划新材料技术领域专家组的验收。主要成果: 动力电源薄膜材料、工艺与产业化技术。

(3) **国家杰出青年基金结题验收**: 2010年12月, 任务来源国家自然科学基金杰出青年基金项目“新型材料的力学问题”, 通过国家自然科学基金委验收, **成绩为优秀**, 结论“全面完成计划, 研究工作取得突出进展”。主要成果: 薄膜涂层体系抗剥落指标体系及其表征方法。

(4) **国家自然科学基金重大项目验收**: 2021年3月, 任务来源国家自然科学基金重大项目“热障涂层损伤机理的热力化耦合理论与表征方法”通过了国家自然科学基金委验收。主要成果: 热障涂层热-蚀耦合模型、四维重构方法及抗热-蚀微结构调控。

(5) **国家自然科学基金重大项目验收**: 2024年5月, 任务来源国家自然科学基金重大项目“先进热障涂层体系的强韧和破坏机制的标准规范研究”通过了国家自然科学基金委验收, **成绩为优秀**。主要成果: 建立了热障涂层强韧性能、热-蚀表征方法与国家相关标准。

2. 部分成果鉴定意见

2002年6月19日由教育部组织, 对动力电源薄膜的阶段成果进行了鉴定, 原国际材料研究学会联合会主席、中国材料研究学会名誉理事长、中国工程院院士李恒德先生任主任的鉴定专家组认为: “开发了一套具有自主知识产权的完整的生产工艺, 建立了一条高水平中试生产线, 相关产品填补了国内空白, 所研发的外壳薄膜在强度、延伸率、耐蚀性等技术指标达到或超过国际先进水平。”

2019年12月9日, 对航空发动机热障涂层抗剥落关键技术与装置进行了鉴定。航空领域李应红院士、刘大响院士、向巧院士、甘晓华院士, 材料和力学交叉领域魏悦广院士等鉴定专家组认为: “该项目立足自主创新, 在揭示了失效机理的基础上, 发明了系列定量表征与评估方法, 自主研制了关键成套设备, 打破了国际技术封锁和设备禁运, 对解决我国发动机热障涂层寿命与稳定性问题, 提高装备安全性与研制水平, 具有重大意义。项目有重大创新, 总体达到国际先进水平, 在性能表征方面达到国际领先水平。”

3. 中央电视台科技频道专题报道与评价

中央电视台科技频道《走近科学》栏目, 对动力电源薄膜研究成果进行了长达半小时的专题报导, 指出: “针对现阶段只有日本和德国能够生产高性能电池外壳材料的窘状, 湘潭大学研制了一种高性能电池外壳材料, 结合力强, 耐蚀性好, 深冲性能及电导性能优越, 产品性能稳定, 填补了国内空白”。节目在中央电视台第4套新闻频道、第9套国际频道分时段多次重播。

4. 国际同行客观评价

成果出版 99.2 万字的《热障涂层破坏理论与评价技术》专著, 在 Phys. Rev. Lett.、Adv. Mater.、Adv. Fun. Mater.、Nature Comm.等权威期刊发表论文, 获得了国际同行正面评价:

(1) 我国航空发动机专家刘大响院士为《热障涂层破坏理论与评价技术》专著作序, 指出: 该书有利于我国热障涂层安全应用与发展, 将为我国成为航空强国做出重要贡献。

(2) 英国皇家工程院院士、国际测量协会主席、英国伦敦城市大学 K. T. V. Grattan 教授在 *Measurement*, 2019, 139: 387-402 中引用该项目 10 篇文章, 指出: 在涂层薄膜体系力学性能与损伤检测方面做出了多方面的贡献。

(3) 英国皇家科学院院士、英国皇家工程院院士、中国科学院外籍院士、英国曼彻斯特大学 Philip J. Withers 教授在 *Scripta Mater.* 2020, 176: 94-98 指出: 该项目有效表征出火山灰腐蚀时涂层微结构的演变规律。

(4) 英国皇家工程院院士、英国牛津大学 A.C.F. Cocks 教授, 在 *Int. J. Mech. Sci.* 2021, 189: 105983 中指出: 模型与方法阐明了涂层复杂而又非常重要的应力场及其耦合机制。

5. 用户评价举例

应用于包括所有航空发动机机主机所、热障涂层研制生产及动力电源领域 10 个单位及其重点型号, 应用单位评价“关键技术支撑”“填补技术空白”“重大军事效益”等。举例如下:

(1) 中国航发沈阳发动机研究所: 获得了型号热障涂层服役后失效模式及机制, 制定了航空发动机热障涂层试验验证方法与标准, 为 10 系列装备安全以及四代机、大运等重大型号研制提供了重要手段和关键技术支撑, 具有重大军事与社会效益。

(2) 中国航发四川燃气涡轮研究院: 解决了试车前零部件热障涂层模拟考核方法缺失难题, 为型号涂层性能优化提供了关键技术指导, 助力型号发动机实现持久试车和试飞。

(3) 中国航发贵阳发动机设计研究所: 解决了试车前模拟考核设备与标准难题, 为我所发动机涡轮叶片热障涂层检测提供了重要手段和关键技术支撑, 具有重大的军事与社会效益。

(4) 中国航发湖南动力机械研究所: 解决了涂层设计没有依据、检验没有方法和标准的难题, ... 填补了小发热障涂层评估方法与试车前试验模拟测试装置领域的技术空白, 指定为热障涂层评估长期合作单位和综合试验验证的第三方测试机构。

(5) 中国航发商用航空发动机责任有限公司: 支撑各型号研制单位热障涂层考核验证与性能评估, 获得了关键性能数据与优化依据, 为涂层工艺优化和质量提升提供了关键技术支持。

(6) 中国航发北京航空材料研究院: 方法对我院热障涂层工艺与性能提升提供了重要支撑, 为型号发动机热障涂层研制与应用提供了重要试验参考, 具有重要的军事意义。

(7) 中国航发南方工业有限公司: 热障涂层抗剥落技术支撑热障涂层工艺获得突破性提升, 实现了在 XX9 等小发火焰筒、涡轮外环的批产应用, 稳定性寿命达 1000 小时, 火焰筒上 2000 小时后涂层未见剥落, 产生了显著军事与社会效益。

(8) 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所: 分析了裂纹萌生与扩展过程, 揭示过渡层力学性能失配诱导裂纹扩展机理, 为推动热障涂层在船用燃气轮机应用提供必要的技术支撑。

(9) 常州超创公司指出: 这款动力电源薄膜材料在综合性能上全面超越国外同类产品, 产先出十足的国货实力, 推动了相关产品迭代升级, 促使整个产业链迈向新的发展高度。

(10) 宜昌力佳公司指出: 产品在薄膜结合力和耐蚀性能等方面达到国际领先水平, 提升了我司产品相关性能与产品竞争力, 夯实了我公司在电源电池领域的领先地位。

项目简介

耐热-蚀特种功能涂层薄膜，是指耐高温、高隔热、耐腐蚀且具有丰富微结构与表/界面设计的功能材料，是支撑航空、航天、航海、能源等重大装备的关键材料。如航空发动机耐热-蚀热障涂层，可提升涡轮叶片承温能力 100-300°C，成为先进航空发动机必不可少的热防护材料。再如耐热-蚀镍基薄膜，可提升电池外壳腐蚀性能 1 个数量级，成为动力电源领域的国际竞争热点。因此，两机专项、大飞机、深空探测、载人航天与探月等国家重大专项，均把耐热-蚀涂层薄膜列为关键材料与技术先导。热、腐蚀尤其两者耦合作用下涂层薄膜剥落是巨大瓶颈，如高温燃气且伴有氧化、固体介质腐蚀的热障涂层热-蚀剥落，离子输运/反应诱导的薄膜热-蚀剥落，是制约航空发动机和动力电源安全服役的重大现实问题。然而，涂层薄膜复杂的成分、结构、热-蚀环境，丰富且伴随有新物质生长与微结构演化的失效形式，剥落过程与影响因素错综复杂，抗剥落能力评价与提升极为困难，复杂微结构工艺实现难，关键设备与技术面临国际封锁。传统基于工程经验的界面处理和测试迭代，无法刻画复杂失效过程，难以实现针对性抗剥落设计。

项目提出了从热-蚀机理出发的抗剥落设计与制备新思路，在国家 863 计划、国家自然科学基金杰出青年基金、重大项目等持续资助下，历经二十年，建立了针对热-蚀涂层薄膜失效的评价理论与试验平台，突破了抗剥落微结构设计、工艺实现与国产设备等关键技术，取得了理论、技术、设备、产品与型号应用系统性的原始创新与突破。主要发明内容如下：

(1) 建立了涂层薄膜热-蚀耦合理论与失效预测方法，自主研制了热-蚀环境模拟与实时检测成套试验平台，提炼出涂层薄膜耐热-蚀评价指标体系，解决抗剥落能力评价没有依据的难题。建立了耐热-蚀涂层薄膜界面氧化、高温腐蚀、离子输运等典型失效的力热化耦合理论，发明了复杂结构涂层薄膜新物质生长与微结构演变的四维重构技术，从理论上刻画出涂层薄膜热-蚀剥落过程及其不可忽略的力化耦合机制。突破了超音速焰粒耦合、高黏性固体熔融介质加载、离子传输以及极端环境下信号采集等难题，研制了燃气热冲击、高温高速旋转、介质/离子腐蚀等热-蚀环境模拟与实时检测成套设备。发明了考虑环境、性能与结构分散性以及多失效模式协同的热-蚀失效预测方法，建立了系统性的抗剥落结构、性能与环境指标，解决了抗剥落能力评价没有科学依据的难题。

(2) 发明了涂层薄膜强韧性能及抗剥落指标表征技术，建立了热蚀失效与性能、环境的关联，提出并发明了铁弹增韧、界面粗糙度、梯度层等调控策略与工艺技术，实现涂层薄膜抗剥落设计从工程经验到科学理论的跨越。发明了涂层薄膜本征强韧及抗剥落指标的表征方法与测试标准，实现了室温-1700°C 强韧性能与指标的表征。建立了热-蚀失效与性能、环境的无量纲关系和失效机制图，揭示了涂层薄膜剥落寿命与性能分散度的微结构调控机制。以此提出了铁弹增韧、稳定剂钉扎、梯度层及界面粗糙度、应力调控等涂层薄膜抗剥落策略，发明了多相粒子复合、高速脉冲喷射电沉积、原位补氧、钼辐射加热、270° 翻转电子束沉积等工艺技术，实现了抗剥落涂层薄膜微结构设计可与控制备，提升热障涂层耐热-蚀剥落能力 4 倍，研制的动力电源多层薄膜相比国际露铁率低 30%、耐蚀性高 1 倍。

(3) 针对航空发动机热障涂层和动力电源镍基耐热蚀薄膜两种体系，自主研制了部件级涂层原位补氧电子束沉积设备及薄膜连续高速脉冲喷射电沉积生产线，突破了产业化制备生产技术，形成耐热-蚀涂层薄膜自主可控能力。突破了氧-真空协调、电子束-基底温度梯度、钼辐射加热等瓶颈，自主研制出原位补氧电子束沉积成套设备，相比国际公开水平制备效率高出 33%、能耗降低 1 倍。发明了变曲率复杂工件涂层可控制备技术，解决了柱状晶团聚、缺氧、畴结构缺失等工程难题，实现了复杂形状热障涂层可控制备，通过近服役环境燃气热冲击寿命考核，形成自主可控能力。发明

了薄膜电沉积产业化工艺技术与脉冲喷射电沉积陈涛设备，建成世界幅宽最大，年产 5000 吨的产业化生产线，生产成本比国际降低 1 个数量级，打破了高端动力电源薄膜长期受制于人的局面。

项目从热-蚀涂层薄膜剥落的失效理论与评价技术出发，提出涂层薄膜抗剥落能力的指标体系，发明了剥落能力与指标的试验与测试技术，以此提出铁弹畴、稳定剂钉扎、界面粗糙度、应力等抗剥落设计策略，发明微结构可控的制备工艺并研制出关键的制备与剥落能力考核评价设备，形成了理论、技术、设备、产品的全链条能力。成果应用于包括所有航空发动机主机所、热障涂层核心研制生产单位、动力能源行业优势单位等在内的 10 个重点单位。抗剥落评价与提升技术用于热障涂层及其等离子喷涂与物理气相沉积工艺，三代机 10 系列、四代机 15 型号、涡 X13、运 20、CJ1000A、小发轴 9 和轴 10 等 7 个重大装备型号，实现了抗剥落评价从工程经验到科学理论的跨越，解决了热障涂层试车前考核平台、方法、指标与标准缺失的巨大难题，推动热障涂层微结构与工艺设计、型号应用、寿命与可靠性等关键技术突破，实现现役战机主动力 100%评估，助力最先进发动机持久试车试飞。研制的动力电源薄膜广泛应用于碱性电池、高端扣式电池与动力锂电池领域，占领扣式电池领域国内 70%市场。

项目授权美国发明专利 2 项、德国发明专利 1 项，国家发明专利 64 项；制定了我国首套热障涂层抗剥落评价国军标 1 套，含 11 个标准；近三年产生的经济效益 5.7 亿元；培养第一完成人获中国青年科技奖特别奖等，第二完成人获国家杰青、国家教学名师，第五完成人为湖南永盛新材料有限公司技术首席，还培养了国家杰青、优青、教育部 U40 等国家级人才；推动所在学科获批国家重点学科、国家级教学团队、国家级实验教学示范中心、国家级教学成果二等奖等平台 and 荣誉，推动了材料和力学学科的交叉与融合。多项技术为“国内首个”“国内唯一”“突破国际封锁”，被用户单位评价“为装备安全及四代机、大运等重大型号研制提供了重要手段和关键技术支撑”“填补了热障涂层评估方法与试车前试验模拟测试装置领域的技术空白”“助力了我国新型航空发动机的定型首飞”。鉴定专家组认为：“开发了一套具有自主知识产权的完整生产工艺，建立了一条高水平中试生产线，相关产品填补了国内空白，所研发的外壳薄膜在强度、延伸率、耐蚀性等技术指标达到或超过国际先进水平。”“项目打破了国际技术封锁和设备禁运，解决我国发动机热障涂层寿命与稳定性问题，有重大创新，在性能表征方面达到国际领先水平”。中央电视台科技频道《走近科学》栏目长达半小时的专题报导，指出：“针对现阶段只有日本和德国能够生产高性能电池外壳材料的窘状，项目研制了一种高性能电池外壳材料，结合力强，耐蚀性能好，深冲性能及电导性能优越，产品性能稳定，填补了国内空白”。

应用情况和效益

1. 应用情况

本成果已应用于包括所有航空发动机主机所、热障涂层核心研制生产单位、动力能源行业优势单位等在内的 16 个重点单位。抗剥落评价与提升技术用于热障涂层及其等离子喷涂与物理气相沉积工艺，三代机 10 系列、四代机 15 型号、涡 X13、运 20、CJ1000A、小发轴 9 和轴 10 等 7 个重大装备型号，实现了抗剥落评价从工程经验到科学理论的跨越，解决了试车前考核平台、方法与标准缺失的巨大难题，推动热障涂层型号应用、寿命与可靠性大幅提升，助力型号发动机持久试车和试飞。基于抗剥落技术设计和研制的热障涂层通过近服役环境模拟考核，研制的动力电源薄膜依次解决了露铁、绿霉、掉粉等工程化难题，实现产业化生产并推广应用，占领扣式电池领域国内 70%以上市场，近三年销售动力电源薄膜 5.7 亿元，取得了重大的军事、社会和显著经济效益。

表 2 主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用技术	应用对象及规模	应用起止时间	单位联系人/ 固定电话
1	中国航发沈阳发动机研究所	1. 热障涂层剥落过程与机理 2. 抗剥落能力考核 3. 热障涂层安全服役条件与优化依据	1. 三代机 10 系列涡轮叶片热障涂层考核数百件 2. 热障涂层试件若干 3. 大运及四代机涡轮叶片热障涂层若干	2014.05-至今	马小军
2	中国航发四川燃气涡轮研究	1. 热障涂层剥落过程与机理 2. 抗剥落能力考核 3. 工艺选择和优化	1. EBPVD 热障涂层工艺评价与筛选近 10 家 2. 涡轮叶片热障涂层抗热-蚀能力评价考核 3. 四代机 15 型号涡轮叶片热障涂层模拟考核与失效分析 4. 涡 X15 叶片涂层方案评价与工艺优化 5. 涡 X15 叶片 CMAS 腐蚀抗剥落能力评价	2022.01-2023.12	郭会明
3	中国航发贵阳发动机设计所	1. 热障涂层剥落机理 2. 抗剥落能力考核 3. 高速旋转涡轮叶片热障涂层温度场与损伤检测	1. 各种工艺热障涂层抗剥落指标 2. 涡 X13 涡轮叶片抗剥落能力考核 3. 涡轮叶片热障涂层数百件	2019.03-至今	张金锋
4	中国航发湖南动力机械研究所	1. 热障涂层失效机理 2. 抗剥落指标 3. 抗剥落能力考核 4. 高温涂层抗剥落微结构设计	1. EBPVD、PS-PVD 和 APS 工艺各种试片千余件 2. 上述三种工艺涡轮叶片涂层 200 多件 3. 小发轴 9 和轴 10 及某预研型号涡轮叶片热障涂层	2014.05-至今	李维
5	中国航发商用航空发动机有限责任公司	1. 热障涂层失效机理 2. 环境模拟试验与测试	1. PtAl1、MCrAlY 两种过渡层的涡轮叶片热障涂层 2. CJ1000A 型号涡轮叶片热障涂层 3. 碳化硅、碳碳复材等新型涡轮叶片	2016.10-至今	高栋
6	中国航发南方工业有限公司	1. 热障涂层失效机理 2. 性能损伤定量表征 3. 服役性能评估 4. 服役环境模拟与测试	1. 等离子喷涂热障涂层工艺 2. 新型热障涂层性能评估与分析 3. 火焰筒热障涂层生产技术研发与工艺评价 4. 小发轴 9 和轴 10 型号热障涂层服役行为评价	2012.05-至今	汪云程

7	中国航发北京航空材料研究院	1. 热障涂层失效机理 2. 界面脱层无损检测方法 3. 力学性能表征技术	1. EBPVD 热障涂层工艺研究 2. 四代机 15 型号热障涂层工艺 3. 四代机 15 型号热障涂层服役性能评估 4. 三代机 10 系列涡轮叶片热障涂层性能评估	2013. 02-2018. 02	何利民
8	中国船舶集团有限公司第七〇三研究所	1. 热障涂层失效预测与四维重构技术 2. 抗剥落指标表征技术 3. 涂层热-蚀机理	1. 试片状热障涂层 2. 涡轮叶片热障涂层 3. 服役前后叶片涂层 4. 失效机理与优化方案	2022. 10-至今	卫嘉
9	湖南永盛新材料有限公司	1. 动力电源薄膜材料成分与设计方案 2. 功能梯度镀层结构设计 3. 动力电源薄膜电镀工艺	1. 电源薄膜产业化工艺与材料 2. 推广应用至锂离子电池、动力电源等领域	2012. 02-至今	刘小铷
10	常州金坛超创电池有限公司	1. 动力电源薄膜材料	1. 扣式锂电池 2. 碱性电池	2012. 01-至今	解玉新

2. 应用效果

2.1 耐热-蚀薄膜涂层抗剥落技术

本成果所发明的薄膜涂层耐热-蚀剥落技术，解决了长期以来我国耐热-蚀薄膜涂层抗剥落能力指标不清、涂层微结构设计没有依据、表征方法不科学等突出问题，广泛应用于我国热障涂层、动力电源薄膜等领域，对涂层薄膜应用和型号装备发展发挥了不可替代的关键作用。

（1）提升我国耐热-蚀薄膜涂层研制能力、寿命与稳定性

2014 年以来，本成果在中国航发集团各单位逐步获得推广应用，利用热障涂层剥落的热-蚀理论、抗剥落性能表征技术、环境模拟实验等关键技术，为几乎所有应用热障涂层的发动机型号提供性能评价和优化的方法技术、数据依据，取得突出效果，基于各种型号技术方法的普适性制定了我国热障涂层抗剥落能力评价与考核的首套国军标，解决了我国热障涂层抗剥落评价没有指标、没有方法、没有标准的难题。

2002 年以来，本成果与湖南永盛新材料股份有限公司（前身为湖南利德材料科技有限公司）合作，从动力电源薄膜材料结构与功能上创新，开发出一系列多层复合、镍/磷合金复合、镍/钴纳米线复合等薄膜，并对材料设计、制备工艺、性能表征及产业化关键技术进行了系统研发，建立了国际领先的示范性生产线，实现了工程化应用，打破了国外的技术垄断，生产线成本同比国际降低 1 个数量级的同时，露铁率、耐蚀性能等关键指标超过国际最高水平。

2016 年以来，抗剥落技术用于中国航发贵阳精密铸造有限公司物理气相沉积涂层的研制，当时公司涂层按照现有氧化称重、界面结合强度标准均合格，但热循环寿命仅 10 多个循环。为此，项目从热障涂层的热-蚀失效过程与机理出发，发现了界面白色层、柱状晶团聚等物理现象，提出了界面温度、

粗糙度等工艺方案，建立了氧化层厚度、界面形貌、断裂韧性等测试方法与标准，迅速提升热障涂层热循环寿命至 2500 多个循环，提升了两个数量级。

2012 年以来，中国航发南方工业有限公司应用抗剥落技术，获得了热障涂层抗剥落性能的定量指标与优化依据，发现了过渡层整体氧化及其氧压与界面应力调控机制，以此优化等离子喷涂工艺，实现了在涡 X9 等小发火焰筒、涡轮外环等高温部件的批产应用，稳定性寿命达到 1000 小时，涡 X9 火焰筒上服役 2000 小时未见剥落。

2016 年-2019 年，与中国航发北京航空材料研究院通过共同承担国家自然科学基金项目，开展了热障涂层物理气相沉积工艺评价与迭代研究，发现了界面局域化氧化并提出了粗糙度调控方案，以此大幅度提升热障涂层性能。后期两个单位共同承担四代机 15 型号热障涂层研究任务，采用评估技术与工艺的反馈迭代，最终确定了涡轮叶片涂层工艺方案并通过考核验证，支撑了重大型号研制。

（2）形成了型号部件耐热-蚀环境地面考核能力，保障装备安全与耐热-蚀涂层研制

建立了我国航空装备与能源领域用耐热-蚀薄膜涂层试车前的地面考核方法与测试能力，解决了氧化称重、高温热循环、对粘拉伸等常规手段不能真实反映涂层抗剥落能力的突出问题，通过包括我国所有航空发动机主机所在内的涂层设计、研制与应用单位的采纳与应用，保障了 7 个重点型号的涂层应用与研制。

三代机 10 系列发动机是我国热障涂层技术批产应用的第一个型号，通过中国航发沈阳发动机研究所以及型号涂层生产单位的应用采纳，本项目完成型号热障涂层服役行为分析、抗剥落能力表征与工艺优化方案等，推动了热障涂层型号应用、寿命与稳定性提升等关键技术突破，极大程度上保障了装备服役安全与可靠性。

四代机 15 型号发动机，因为服役温度比 10 系列提升 100°C 而使得热障涂层必不可少，但热-蚀（高温 CMAS 腐蚀）剥落极为严重，热蚀机理与解决办法是长期困扰的巨大难题。本成果技术支撑中国航发四川燃气涡轮研究院迅速筛选出性能优异的涂层，支撑型号热障涂层工艺优化并解决热蚀剥落难题，达到首翻期 500 小时寿命要求，助力型号持久试车和试飞。

CJ1000A 是我国自主研制的首个民用发动机型号，通过中国航发商用航空发动机有限公司的反复调研与考察，为公司建立了模拟涡轮叶片热-蚀等服役环境的实验考核方法，获得了涂层模拟服役环境性能，给出了性能优化依据，建立了模拟服役环境下热障涂层试验考核标准，为涂层工艺优化和质量提升提供了关键技术支持。

为轴 9、轴 9 等直升机用发动机建立了系统的涂层抗剥落指标、测试与考核方法，支撑热障涂层在涡 X9 等小发火焰筒、涡轮外环等高温部件的批产应用，服役稳定性寿命达到 1000 小时，轴 9 火焰筒上服役 2000 小时后涂层未见剥落。

2.2 耐热-蚀薄膜涂层应用效果

（1）形成我国热障涂层制备设备与工艺的自主可控能力

基于热障涂层耐热-蚀理论与抗剥落评价技术，从机理上揭示了涂层分散性剥落的物理机制，提出了涂层剥落预测方法并建立了抗剥落能力评价的系统性指标。在此基础上，提出了陶瓷层的铁弹畴增韧、畴的稳定剂钉扎、孔隙与本征缺陷均匀度控制以及界面的梯度过渡层、粗糙度与应力调控等策略，发明了原位补氧、氧化钇钉扎畴结构、270° 翻转电子束以及过渡层温度、氧压与粗糙度的工艺控制方案，自主研制我国首台科研级以及生产级热障涂层原位补氧型物理气相沉积装备，依次攻克了界面白色层、柱状晶团聚、涂层缺氧等巨大难题，提升热障涂层热-蚀剥落能力 2 倍，形成了热障涂层自主可控能力。

（2）建成动力电源外壳薄膜生产销售公司，产品满足碱性电池、高端扣式锂电池、动力锂电池等行业的高要求，占领扣式电池领域国内 70%以上市场

自主开发了电位调控高速脉冲喷射电沉积技术，发明了多层镍薄膜、镍/磷合金复合薄膜、镍/钴纳米线复合薄膜等系列材料及其连续电沉积工艺，实现了不同晶粒尺寸材料在金属基底上的连续生长，解决了电源外壳薄膜露铁、绿霉、掉粉等工程化难题，开发了复合薄膜的高速电沉积产业化技术，实现了批量生产并应用于碱性电池、高端扣式电池与动力锂电池领域，占领扣式电池国内 70%以上市场，近三年产生销售收入 5.46 亿元。目前已逐步推广到空天动力电源、电动汽车等领域，具有巨大的应用前景。

2.3 形成核心技术自主能力，推动学科发展，培养人才

我国航空、能源等领域基础薄弱，耐热-蚀薄膜涂层作为未来越来越迫切的材料体系，抗剥落能力评价与提升也越来越备受关注。但长期以来，我国现役薄膜涂层剥落问题突出，严重困扰装备安全与自主可控。本项目形成我国耐热-蚀薄膜涂层抗剥落理论、方法与技术的原始创新能力，在此基础上实现了抗热-蚀薄膜涂层微结构设计与控制制备，并实现了制备设备的自主研制，打破了国际技术封锁和设备禁运，形成了自主可控能力。

本成果是材料和力学交叉融合的典型示例，不仅推动了热-蚀耦合力学理论与实验方法的发展，同时也实现了薄膜涂层材料、工艺尤其是先进设备自主可控能力的提升，是材料和力学交叉融合的典型。基于本成果的研究，项目完成人牵头获批力学类国家重点学科、材料类一级学科博士点、国家级教学团队、国家级实验教学示范中心、教育部重点实验室等学科平台，推动了力学和材料学科的交叉与融合。

本成果还培养第一完成人中国青年科技奖特别奖获得者，第二完成人为国家杰出青年基金获得者、国家级教学名师，第五完成人为湖南永盛新材料有限公司首席，第三、四完成人为年青学术梯队，为我国耐热-蚀薄膜涂层可持续发展建设了学术队伍。

完成人合作关系说明

项目由西安电子科技大学、湘潭大学、湖南永盛新材料股份有限公司联合完成。第一完成人杨丽 2014 年 12 月至 2020 年 8 月工作于湘潭大学，2020 年 9 月与第二完成人周益春等以高层次人才团队引进至西安电子科技大学，在湘潭大学和西安电子科技大学工作期间，一直带领团队开展耐热-蚀特种功能薄膜涂层抗剥落与可控制备技术研究。第二完成人周益春作为博士生导师先后培养了第二完成人杨丽和第五完成人潘勇，与杨丽合作授权发明专利 1-8、10。第三完成人潘俊安为湘潭大学博士生，毕业后留校工作，加入杨丽、潘勇和周益春团队，参与潘勇主持的 863 项目，与潘勇合作授权专利 9。第四完成人刘俊凯博士毕业后加入杨丽团队，共同开展热障涂层的研究，与周益春、杨丽合作授权专利 2 和 8。第五完成人潘勇毕业后开展动力电源薄膜产业化研究，成立湖南永盛新材料股份有限公司并担任董事长、技术首席，与第二完成人合作完成国家 863 项目。