

2026 年度拟提名陕西省科技进步奖项目公示内容

一、项目名称

极端服役高强钛合金管路全流程精确成形技术及应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省知识产权局

提名意见：

该项目面向航空航天极端服役高强钛合金管路自主研制需求，针对跨工序制造信息演变难预测、全流程形性难调控及成形装备、服役评价方法缺乏等瓶颈，依托国家自然科学基金、民机专项、装备预研等 20 余项国家和省部级项目，历经 15 年产学研用联合攻关，构建“理论突破-工艺创新-装备研制-评价保障”创新链。项目创立贯通“熔炼-轧制-弯曲-连接-装配-服役”的跨工序跨尺度智能预测与正向设计方法，发明服役驱动的高强钛管全流程形性调控极限成形技术，研制成形与服役测试成套装备，建立标准体系；使航空液压管路工作压力提升至 35 MPa、连接组件疲劳寿命达到 1500 万次以上，推动管路制造由经验试错向预测性正向设计、由单工序优化控制向全流程形性协同调控的转变。

项目获授权发明专利 65 件，制定标准 13 项，成果已应用于 J20、Y20、Z20、C919 等飞机及航空发动机、运载火箭等装备，显著提升我国空天管路自主研制、批量制造和安全保障能力，经济社会效益显著。经中国航空学会鉴定，项目总体技术达到国际先进水平，其中跨工序跨尺度智能预测方法和高强钛合金管路全流程形性调控极限成形技术处于国际领先水平。项目创新性强、技术成熟、应用成效突出，经济社会效益及行业带动作用显著。

项目提名材料齐全、内容真实规范，知识产权权属清晰，完成人排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖一等奖授奖条件。陕西省知识产权局提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

三、项目简介

先进飞机、运载火箭等高端装备是大国竞争的战略制高点，也是维护国家安全的“国之重器”。国家“十四五”“十五五”规划明确提出，加快航空航天产业发展，突破关键零部件、专用材料与核心工艺瓶颈，提升产业链自主可控水平。**管路件被誉为飞机的“动脉血管”和“生命控制线”**，广泛用于液压、燃油、环控等核心系统，其制造质量决定装备服役极限与安全边界。随着装备向高压、宽温域、强振动方向发展，传统材料与制造技术已难以满足高可靠、长寿命和轻量化需求。高强钛管兼具轻质高强、耐高压、耐宽温域和抗疲劳等优势，是突破传统管路性能极限的首选材料。然而，其制造涵盖铸锭制备、精密轧制、极限弯曲、连接装配及服役评价等工序，涉及成分-组织-性能-残余应力的跨工序、跨尺度演化与耦合调控，技术链长、窗口窄、质量控制难。我国相关研发起步较晚，长期面临理论薄弱、工艺缺失、装备受制等“卡脖子”问题，严重制约高端装备关键管路自主研制和产业链安全。

国家自然科学基金重点/优青/面上项目、装发共用技术项目、民机专项等 20 余项国家级和省部级任务，项目组历时 15 年开展产学研用联合攻关，围绕“材料制备-成形制造-服役评价”全生命周期，提出“全流程形性协同调控”的创新思路，形成“理论突破-工艺创新-装备研制-评价保障”完整技术链。项目创立跨工序跨尺度预测性正向设计方法，突破高性能管材制备、极限弯曲、高可靠连接和服役评价关键技术，研制铸锭熔炼、精密轧制、极限智能弯曲、精准连接及疲劳评价等系列装备与生产线，形成覆盖设计、制造、评价与验证的自主技术体系。

项目成果获授权发明专利 65 件，制定 GF/GJB/HB 等相关标准 13 项，在 Int J Mach Tools Manu、Int J Plast 等材料成形领域顶尖期刊发表学术论文 96 篇。项目形成外径 6~32 mm、壁厚 0.5~2.1 mm、12 个规格高强 TA18 钛管稳定批产能力，累计交付 1100 批次、22.8 万米高品质钛管；完成 1200 余批次、5 万余件管路件考核验证，支撑多型航空、航天和航空发动机管路研制与装机应用，实现从关键材料、核心工艺到成套装备和评价标准的全链条自主可控。

项目取得主要科技创新及先进性概述如下：

1. 创立全生命周期跨工序跨尺度智能预测方法体系。面向轧制、弯曲、连接和服役等多工序，融合代表性试验、多尺度计算、物理机制与深度学习，构建热力耦合变形-瞬时卸载-滞后回弹物理-数据融合智能本构模型，实现强织构钛管在不同温度、应力状态和加载路径下材料响应的统一描述与快速预测；集成损伤断裂、失稳起皱、全时域回弹物理模型与 PSO-BP、LSTM-CNN 等算法，形成断裂-起皱-瞬时/滞后回弹多缺陷协同预测与成形窗口快速判定方法；建立“熔炼-轧制-弯曲-连接-装配-服役”织构和残余应力遗传演变模型，以及高压与动态外载耦合下钛管组件疲劳寿命预测方法，实现制造状态、组织性能与服役失效全周期协同预测。

2. 发明服役性能驱动的全流程形性调控精准成形制造技术。发明预留电极多级真空熔炼工艺，将铸锭成分偏差控制在 0.03%以内、杂质偏差控制在 0.01%

以内；提出“初始组织-道次变形-热历程-表面处理”协同调控方法，使钛管 CSR 由不高于 0.6 提升至 1.6~2.5，疲劳寿命由不高于 800 万次提升至 1500 万次以上。发明“多模具约束+梯度温度场”温热/深冷极限弯曲、PINN 回弹补偿、电脉冲残余应力调控及在线监测自适应控制技术，使弯曲半径由 $R=3\sim 5D$ 突破至 $R\leq 1.5D$ ，试弯次数降至 1 次以内，材料节省 50%以上。发展内滚压、轴向挤压和形状记忆合金收缩式三类连接技术及实时扭矩精准装配方法，使管路工作压力由 21 MPa 提升至 28~35 MPa，连接组件疲劳寿命达到 1500 万次以上。

3. 研制了高强钛合金管路成形制造与服役成套装备，建立了相关标准体系。研制多级真空熔炼、精密轧制及“冷轧-退火-矫直-表处”生产线；形成梯度热场、局部深冷和在线监测自适应控制三类智能弯曲装备，覆盖直径 6~219 mm、径厚比 10~70 的管材规格极限弯曲成形制造；研制力矩-位移控制内滚压、双压头轴向压接和记忆合金控温连接装备，以及旋转变曲、脉冲疲劳等测试装备 18 台套，建立“方法-装备-标准-验证”一体化评价体系。

技术先进性：本项目面向航空航天极端服役高强钛合金管路自主研制需求，开创了跨工序全流程形性调控精确成形制造的新途径。经科技查新（L29 工作站）及国内外同类技术对比，项目首创贯通“制备-弯曲-连接-装配-服役”的全链条可预测性正向设计方法，突破高性能管材制备、极限弯曲、高可靠连接及服役评价关键技术，研制自主知识产权系列装备，构建航空高强钛合金管相关标准体系。代表性指标达到 $CSR\geq 1.6$ 、弯曲半径 $R\leq 1.5D$ 、试弯 ≤ 1 次、工作压力 28~35 MPa、疲劳寿命 ≥ 1500 万次，优于同类技术 $CSR\geq 1.30$ 、 $R\geq 3D$ 、试弯 ≥ 3 次及疲劳寿命 ≥ 1000 万次。2026 年 8 月，中国航空学会组织同行专家对项目成果进行鉴定，李贺军院士、苑世剑院士担任专家组组长，**鉴定认为：项目技术难度大、创新性强，具有自主知识产权，总体技术达到国际先进水平，其中跨工序跨尺度智能预测方法、高强钛合金管路全流程形性调控极限成形技术处于国际领先水平。**

应用效果：项目成果已在航空工业成飞、沈飞、602 所、301 所等 19 家行业重点单位应用，支撑 J20、Y20、Z20、C919、AG600 等飞机，WZ16 系列航空发动机及 CZ2C、CZ3B、CZ9 等 20 余个重点型号管路设计、研制与批量制造，首次实现 35 MPa 高强钛合金液压管路在新型号上的装机应用。典型应用中，导管试弯由 3~5 次降至 ≤ 1 次，试制周期缩短 38%，一次合格率由 78%提高至 95%以上；大口径难成形管件成品率由不足 50%提升至 95%以上。成果还拓展应用于兵器、核能、石油化工和新能源等领域，突破大口径薄壁管件、难熔合金管及高压管路的精准制造瓶颈。

经济与社会效益：近三年，项目成果累计新增销售额 15.6 亿元、新增利润 3.4 亿元。项目实现我国航空钛管自主研制，打破先进航空航天等领域高端装备管路制造关键技术长期受制于人的被动局面，显著提升高端装备关键管路的自主研制、批量制造和安全保障能力。成果获得国内外学术同行和行业单位广泛认可，形成了具有重要国际学术影响力和行业支撑能力的创新团队，为我国高端装备自主研制和高质量发展提供持续支撑。

四、客观评价

项目成果已广泛应用于成飞、沈飞、602 所、301 所等核心主机单位和西部钛业、成都航天长征等行业重点单位，支撑 J20、Y20、Z20、C919、AG600 等系列主力在役型号、在研型号等飞机管路系统研制与批量制造，首次实现 35MPa 高强钛合金液压管路在新型号上装机应用，拓展应用于 CZ2C、CZ3B、CZ9 等运载火箭管路研制，以及兵器、石油化工等领域关键管路研制。研究成果在 Int J Mach Tools Manu、Int J Plast 等材料与制造领域顶尖期刊发表论文 96 篇，被 52 个国家、264 所机构他引 3698 次，获得国内外同行广泛认可和高度评价，充分证明了成果的创新性和先进性。

1. 国内外代表性学术评价

- 浙江大学谭建荣院士团队在 Appl Math Model (2025, 143: 115964)、Expert Syst Appl (2024, 255: 124577)高度评价 “completed a generalized analytical modeling approach” “provide a knowledge base for designing new customized processing” “enabling proper prediction and compensation for springback angle”。
- 哈尔滨工业大学苑世剑院士团队在 Int J Mach Tools Manu (IJMTM, 2023, 185: 103992; 2024, 204: 104193)高度评价 “bending limit of difficult-to-form tubes was broken” “form a novel energy field to for complex curved surface components”。
- 美国工程院院士、加州大学 I. Beyerlein 教授在 Int J Plast (IJP, 2023, 161: 103507)高度评价“particularly useful in the description of macroscopic plasticity models for HCP polycrystals”。国际生产工程科学院 CIRP 院士、日本东京大学 J. Yanagimoto 讲席教授在 Mater Sci Eng A (2025, 931: 148227)高度评价“model is particularly advantageous”。
- 英国皇家工程院林建国院士在 Thin Wall Struct (2024, 200: 111904)高度评价 “reflected a global feature”。瑞典林雪平大学 R. Peng 教授在 Acta Mater (2025, 287: 120815)评价“shed light on the extended analysis of HCP-based materials”。
- 韩国科学技术院院士、国际塑性大会主席、IJP 副主编 J.W. Yoon 教授在 IJP (2024, 176: 103962)等 11 篇论文大段引用并高度评价“advanced uncoupled ductile failure criteria have been developed”。韩国工程院院士、浦项工业大学 H. S. Kim 教授在 J Alloy Compd (2023, 933: 167794)评价“successfully predicting the deformation mode activation and texture evolution of Ti-3Al-2.5V”。

2. 典型应用评价

- 中航工业成飞公司评价“突破了高强钛管等难成形弯管国际上公认的成形极限，实现了高性能钛管在我国自主研制军机液压管路中的首次应用，显著提高了飞机整体性能和空间利用率，对解决“跑冒渗漏”重大瓶颈问题提供了关键支撑，具有十分重大的应用价值和意义”。
- 沈阳飞机工业(集团)有限公司评价“成功解决了我公司 J15 等先进军机液压管路用高性能轻量化弯管件的精确成形制造难题，对我公司的型号研制和飞机数字化工程具有十分重大的价值和迫切的意义”。

- 中航工业 602 所评价“应用于我公司 Z20、ZXX 等重点型号直升机管路系统的选材设计与工艺规范制定中，显著缩短了钛管制造周期、降低了制造成本，解决了直升机管路服役性能精准评价的难题，显著提升了直升机液压管路系统的设计制造水平，取得了显著的经济、社会效益和军事效益”。
- 中航工业 301 所评价“编制了管路行业关键标准 16 项，填补了 35MPa 级耐高压管路服役性能评价标准的空白，显著提升了管路性能检测的科学性与准确性，为我单位履行航空工业标准化与质量基础技术研究职能提供了重要支撑，对保障重点型号研制进度、提高装备安全可靠具有重要价值”。
- 西部钛业、张家港华裕、宁夏中色金航、攀钢集团研究院评价“使我国实现了高品质钛管制造技术与装备的自主化，突破了我国航空高强钛管依赖进口的困境”“实现了关键材料与核心技术自主可控，为突破我国航空航天等领域高端管路精密制造卡脖子问题提供了重要支撑”“对我司高性能管材稳定批产提供了重要支撑”“为推动我国航空高性能钛管国产化提供了重要支撑”。
- 成都长之琳和大连长之琳科技股份有限公司评价“推动了航空高可靠管路连接装备向专用化、数字化、精准化和自主化发展，突破了 35MPa 级液压管路高可靠连接瓶颈”“解决了先进飞机全系列 12 个规格 35MPa 级液压管路连接件成形制造难题，为航空管路研制和批量制造提供了重要支撑”。
- 成都凯天电子和辽宁美托科技股份有限公司评价“显著提高了管路弯曲成形质量，提升了材料利用率、管路使用寿命和可靠性，显著提升了我公司复杂管路组件制造能力”“首次实现了我国航空钛合金液压挠性盘旋管研制”。
- 中国运载火箭技术研究院首都航天机械公司和航天七院成都航天长征机械有限公司评价“显著提升了难成形结构管材数控弯曲精确成形方面的技术水平”“突破了我公司在难成形管路数控弯曲成形方面的技术限制”。
- 西安向阳航天材料、西安东风机电、中国兵器工业 206 所和常州市兴通机械制造有限公司“显著提升了我在油气领域大口径复合管成形制造方面的技术能力”“实现了大口径薄壁管件高精度成形，突破了石化大口径质量流量计长期依赖进口的技术瓶颈”“有效提升了我单位波导弯管制造技术水平，对解决我国雷达通信等领域波导弯管件起皱和截面畸变等重大瓶颈问题提供了重要支撑”“推动了高性能管材轧制装备向高精度、数字化、系列化和自主化方向发展”。

五、应用情况

项目成果应用于中航工业成飞、沈飞、602 所、301 所和西部钛业、成都航天长征等 19 家行业重点单位，支撑 J20、Y20、Z20、C919、AG600 等先进飞机和 WZ16 系列航空发动机及 CZ2C、CZ3B、CZ9 运载火箭等 20 余个重点型号管路系统自主设计、研制与批量制造，累计完成 1100 批次、22.8 万米高品质钛管交付，以及 1200 余批次、5 万余件管路件考核验证，拓展应用于兵器、石油化工、新能源等领域关键管路研制和批量生产，展现出广阔的产业化前景和显著的经济社会效益。

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	成都飞机工业(集团)有限责任公司	管材制备、弯曲、连接和服役性能评价技术	J20、C919、AG600 等飞机液压系统管路研制和批量制造	2010 年至今	杨景超 15596898630
2	沈阳飞机工业(集团)有限公司	管材弯曲、连接和服役性能评价技术	J15 等先进飞机液压系统管路研制和批量制造	2015 年至今	白雪山 13840300535
3	中国直升机设计研究所	管材制备和服役性能评价技术	Z20 等先进飞机液压系统管路研制和批量制造	2020 年至今	高占平 18920663381
4	中国航空综合技术研究所	管材连接和服役性能评价技术	J20、Y20 等先进飞机液压系统管路研制和批量制造	2020 年至今	张宗华 15901217741
5	西部钛业有限责任公司	钛管冷轧织构与残余应力调控技术	高强 TA18 钛合金管材研制和批量制造	2020 年至今	杨亚社 13572919743
6	张家港华裕有色金属材料有限公司	钛管冷轧织构与残余应力调控技术	高强 TA18 钛合金管材研制和批量制造	2015 年至今	刘守田 18915670923
7	成都长之琳航空制造有限公司	管材弯曲、连接和服役性能评价技术	高强 TA18 钛合金管路件研制和批量制造	2020 年至今	陈宗涛 13998617368
8	辽宁美托科技股份有限公司	管材弯曲、连接和服役性能评价技术	高强 TA18 钛合金管路件研制和批量制造	2020 年至今	王媛莉 17782745532
9	成都航天长征机械有限公司	管材数控弯曲形性调控成形技术	CZ2C、CZ3B 等贮箱增压系统薄壁不锈钢管路批量制造	2022 年至今	马飞 15828199872
10	西安向阳航天材料股份有限公司	管材数控弯曲形性调控成形技术	大口径双金属复合管研制和批量制造	2020 年至今	王斌 17791212903

- 成功应用于中航工业成飞公司 J20、J10、枭龙、C919、AG600 等型号飞机管路研制和生产，高强 TA18 钛管最小弯曲半径由 3D 降低到 1.5D，实现了高性能钛管在我国自主研制军机液压管路中的首次应用，管路最高工作压力从

21MPa 提升到 28MPa，实现了导管批量制造与装机考核，导管试弯次数从至少 3 次减少为 1 次，试制周期降低了 38%，导管弯曲一次合格率由 78%提高到 95%以上，为解决我国航空管路“跑冒渗漏”重大瓶颈问题提供了关键支撑。

- 成功应用于沈阳飞机工业(集团)有限公司 J15 等先进军机液压管路用高性能弯管件精确成形制造，显著缩短了高性能复杂弯管件试制周期、降低了成本、提高了材料利用率、并提高了弯管使用寿命和可靠性。
- 成功应用于中航工业 602 所 Z20、ZXX 等重点型号直升机液压、燃油等系统管路件的设计与制造，显著缩短了钛管制造周期、降低了制造成本，满足了直升机管路系统对管路件成形精度、力学性能和经济性的要求，显著提升了直升机液压管路系统的设计制造水平，取得了显著的经济和社会效益。
- 成功应用于中航工业 301 所多种型号液压系统管路选型与产品鉴定试验中，完成 1200 余批次、5 万余件管路件考核验证，显著提升了管路性能检测的科学性与准确性，实现 J20、Y20 等在役及在研型号装机应用。
- 成功应用于西部钛业、张家港华裕、宁夏中色金航、攀钢集团研究院等航空材料制造企业 TA18、TA16 等钛合金管材研制和批量制造，批产 TA18 管材的关键指标 CSR 值从 ≤ 0.6 提升至 1.3~2.5，扩口率达到 60%以上，表面残余压应力最大超过 500 MPa，疲劳寿命从 $\leq 600\sim 800$ 万次提升至 ≥ 1500 万次，最高工作压力达到 35 MPa，实现了对国外进口产品的替代，突破了关键材料与技术的自主可控难题，为推动我国航空高性能钛管国产化提供了重要支撑。
- 成功应用于成都长之琳和大连长之琳科技股份有限公司管路组件研制和批量制造，研制了面向 28~35MPa 高压液压管路的高可靠连接装备 10 台/套，配套开发了系列专用模具、工装及控制系统共 200 台/套，形成了覆盖不同材料、规格和连接形式的系列化管路连接形成成套装备，解决了先进飞机全系列 12 个规格 35MPa 液压管路连接件成形制造难题。
- 成功应用于成都凯天电子和辽宁美托科技股份有限公司管路组件研制和批量制造，显著提高了管路弯曲成形质量，提升了材料利用率，使航空液压管路连接组件疲劳寿命稳定达到 ≥ 1500 万次，提高了管路使用寿命和可靠性，显著提升了复杂管路组件制造能力，产生了显著的经济效益和社会效益。
- 成功应用于中国运载火箭技术研究院首都航天机械公司重型火箭 CZ9 航天发动机 YF-90 用 132mm 大口径 2D 小弯曲半径高温合金管路件成形，以及航天七院四川航天长征装备制造公司 CZ-2C、CZ-3B 等火箭贮箱增压系统大口径小弯曲半径不锈钢管路件研制和批量生产，将管路试弯次数从 3~5 次降低至 ≤ 1 次，显著缩短了试制周期、降低了成本、提高了材料利用率。
- 拓展应用于西安向阳航天材料、西安东风机电、中国兵器工业 206 所和常州市兴通机械制造有限公司钛合金、高强钢、双金属复合管等难变形材料管路件和制造装备的研制及批量制造，实现直径 ≥ 120 mm 大口径 316L 不锈钢弯管件精确制造，累计销售轧管机 60 台/套，供货高品质管材 800 余吨，为兵器、石油化工、新能源等领域高端装备自主制造提供了重要支撑。

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	一种钛合金管材织 构强度的确定方 法、装置及设备	中国	ZL202310497378.6	20251209	8564018	西北工业大学/ 张家港华裕有 色金属材料有 限公司	李恒、魏栋、杨 景超、陈玉莹、 刘守田、楚志兵
2	发明专利	一种 TA18 钛合金 铸锭的制造方法	中国	ZL201110251107.X	20121003	1051653	西部钛业有限 责任公司	杨亚社、罗登 超、齐元昊、王 莎、杨永福、文 周峰、李刚、南 莉、董宏军、廖 强、席锦会、杨 建朝
3	发明专利	一种高性能难变形 金属无缝管材冷轧 机组及工艺	中国	ZL202010744143.9	20240719	7204444	太原科技大学	楚志兵、李恒、 石钢、周新亮、 赵晓东、李玉 贵、李亚杰
4	发明专利	一种航空液压系统 用的无缝钛合金管 及其制备方法	中国	ZL202411295636.3	20250422	7890600	张家港华裕有 色金属材料有 限公司	马小强、刘守田
5	发明专利	获取金属材料各向 异性和拉压非对称 性的方法及系统	中国	ZL201710260195.7	20190426	3351536	西北工业大学	李恒、杨恒、黄 卫良、韩瑞、詹 梅

6	发明专利	一种高强钛管数控弯曲滞后回弹补偿控制的研究方法	中国	ZL202110760823.4	20220902	5425102	西北工业大学	李恒、张力文、陈光耀、魏栋、边天军
7	发明专利	一种钛管数控差温加热弯曲成形模具及方法	中国	ZL201610034129.3	20171031	2678321	西北工业大学	杨合、李恒、杨恒、马俊、陶智君、张志勇、韩瑞、李龙、刘碧颖
8	发明专利	电脉冲与超声振动协同消除钛合金弯曲管材残余应力装置	中国	ZL202410911407.3	20251212	8574328	西北工业大学	李恒、张力文、马俊、杨恒
9	发明专利	基于径向收缩应力模型的记忆合金管路连接件设计方法	中国	ZL202411183939.6	20250110	7003114	成都飞机工业(集团)有限责任公司	李光俊、贺子芮、杨景超、王巧玲、段晓艳、吴群
10	发明专利	旋转弯曲疲劳检测装置及旋转弯曲疲劳试验方法	中国	ZL201711201855.0	20230425	5909279	中国航空综合技术研究所	张辉、郭浩然、隋明丽、张宗华

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
李 恒	1	材料学院 党委书记	教授	西北工业大学	西北工业大学	项目负责人,同时也是该项目涉及5个国家基金和部委计划项目的负责人,对创新点1至3均做出了重要贡献,是项目总思路提出、研究方案制定及实现的主要策划和执行者。
马 俊	2	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对创新点1至3做出了重要贡献,主要涉及管材弯曲和连接过程多尺度建模、工艺设计优化及装备开发研究。
杨 恒	3	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对创新点1至3做出了重要贡献,主要涉及管材轧制和疲劳过程多尺度建模、工艺设计优化及装备开发研究。
荣 鹏	4	厂长	研究员	成都飞机工业(集团)有限责任公司	成都飞机工业(集团)有限责任公司	对创新点3做出了重要贡献,主要涉及管路弯曲和连接技术的工程应用。
李光俊	5	高级工艺师	研究员	成都飞机工业(集团)有限责任公司	成都飞机工业(集团)有限责任公司	对创新点3做出了重要贡献,主要涉及管路弯曲和连接技术的工程应用。
齐 亮	6	总经理	工程师	西部钛业有限责任公司	西部钛业有限责任公司	对创新点2和3做出了重要贡献,主要涉及钛合金熔炼和管材轧制技术的工程应用。
张宗华	7	专业副总师	高级工程师	中国航空综合技术研究所	中国航空综合技术研究所	对创新点3做出了重要贡献,主要涉及管路服役测试与考核验证。

马 哲	8	部长	研究员	中国航空综合技术研究所	中国航空综合技术研究所	对创新点 3 做出了重要贡献，主要涉及管路服役考核验证及应用。
楚志兵	9	院长	教授	太原科技大学	太原科技大学	对创新点 3 做出了重要贡献，主要涉及管路轧制装备研制及应用。
杨景超	10	组长	高级工程师	成都飞机工业（集团）有限责任公司	成都飞机工业（集团）有限责任公司	对创新点 2 和 3 做出了重要贡献，主要涉及管材弯曲、连接研究及应用。
李 华	11	技术部部长	高级工程师	张家港华裕有色金属材料有限公司	张家港华裕有色金属材料有限公司	对创新点 2 和 3 做出了重要贡献，主要涉及钛管轧制技术研究及应用。
罗登超	12	副总工程师	副高级工程师	西部钛业有限责任公司	西部钛业有限责任公司	对创新点 3 做出了重要贡献，主要涉及钛管制备技术研究及应用。
杨亚社	13	副总经理	正高级工程师	西部钛业有限责任公司	西部钛业有限责任公司	对创新点 2 做出了重要贡献，主要涉及钛合金熔炼技术及应用。
刘守田	14	常务副总	高级工程师	张家港华裕有色金属材料有限公司	张家港华裕有色金属材料有限公司	对创新点 3 做出了重要贡献，主要涉及钛管制备技术工程应用。
朱宝辉	15	总工程师	正高级工程师	宁夏中色金航钛业有限公司	宁夏中色金航钛业有限公司	对创新点 2 做出了重要贡献，主要涉及钛合金性能调控及应用。

八、主要完成单位情况及创新推广贡献

完成单位	排名	对本项目科技创新和应用推广情况的贡献
西北工业大学	1	该项目第一完成单位及完成人李恒、马俊和杨恒的工作单位，负责了项目的理论、模拟和实验等相关的方案设计及实现工作。在项目研究过程中，西北工业大学为该项目的顺利进行提供了必要的实验条件和工作环境保证，同时为项目的实施提供了管理及相关支持。依托本单位，该项目进行了系统深入的理论、实验、模拟和分析工作，得到了第 1 至第 3 具有重要价值的科技创新点。
成都飞机工业（集团）有限责任公司	2	该项目合作完成单位及完成人荣鹏、李光俊和杨景超的工作单位，主要负责本项目管材弯曲、连接和服役评价技术的验证及工程应用研究，此外依托企业研制需求为该项目研究提供了课题与经费保障。
西部钛业有限责任公司	3	该项目合作完成单位及完成人齐亮、罗登超和杨亚社的工作单位，主要负责本项目钛合金熔炼和管材轧制技术研发及工程应用研究。
中国航空综合技术研究所	4	该项目合作完成单位及完成人张宗华和马哲的工作单位，主要负责本项目管路服役性能评价技术研发及工程应用研究，以及相关管路标准的制定。
太原科技大学	5	该项目合作完成单位及完成人楚志兵的工作单位，主要负责本项目钛合金管材轧制装备研发及工程应用研究。
张家港华裕有色金属材料有限公司	6	该项目合作完成单位及完成人李华和刘守田的工作单位，主要负责本项目高强钛合金管材冷轧及热处理技术和装备研发及工程应用研究。
宁夏中色金航钛业有限公司	7	该项目合作完成单位及完成人朱宝辉的工作单位，主要负责本项目钛合金管材轧制技术和装备研发及工程应用研究。

九、完成人合作关系说明

李恒为本项目第一完成人和负责人。项目实施期间，15 名完成人围绕高强钛合金管路“材料制备—成形制造—连接装配—服役评价”全流程开展长期产学研协同攻关，通过共同承担科研项目、联合申请知识产权、发表论文、制定标准及工程应用等形成了稳定合作关系。

李恒与马俊、杨恒长期围绕高强钛管精密轧制、极限弯曲、回弹及残余应力调控开展合作，主要合作成果包括“一种钛管数控差温加热弯曲成形模具及方法”“电脉冲与超声振动协同消除钛合金弯曲管材残余应力装置”等发明专利，以及“Temperature dependent evolution of anisotropy and asymmetry of α -Ti in

thermomechanical working: Characterization and modeling” “Time-dependent springback of high strength titanium tubular materials: Experiment and modeling”等论文，形成了从极限弯曲到形性调控的长期合作。

李恒、马俊、杨恒与荣鹏、李光俊、杨景超围绕航空管路弯曲、连接装配及型号应用开展产学研合作，通过科研项目、专利、标准共同推进成形技术，推动工程化应用。主要合作成果包括“Breaking bending limit of difficult-to-form titanium tubes by differential heating-based reconstruction of neutral layer shifting” “Failure analysis of aircraft tubular form-fit joints in rotating-bending fatigue tests” “薄壁钛管高温绕弯模具研制与测试”等论文，以及“基于径向收缩应力模型的记忆合金管路连接件设计方法” “一种形状记忆合金管接头扩径装置及方法”等发明专利。

李恒与齐亮、罗登超、杨亚社围绕 TA18 高强钛管铸锭制备、冷轧成形、组织性能调控及疲劳行为开展合作，共同承担“TA18 钛合金管材冷轧模具曲线设计与疲劳行为”等研究任务。罗登超、杨亚社等合作完成“一种 TA18 钛合金铸锭的制造方法”等发明专利，推动高强钛管从铸锭到管材的稳定制备与产业化。

李恒与张宗华、马哲围绕航空管路服役评价、测试方法和标准体系长期合作，共同承担民机专项等任务，张宗华、马哲长期开展航空管路测试评价及标准制定，共同推进服役评价方法、装备与标准体系建设。

李恒与楚志兵围绕高强钛管冷轧、轧制装备及组织性能调控等方面开展合作，代表性合作成果包括“一种高性能难变形金属无缝管材冷轧机组及工艺” “一种钛合金管材织构强度的确定方法、装置及设备”等发明专利和相关论文。

李恒与刘守田、李华围绕钛管织构调控及批量制造开展合作，李恒、刘守田共同完成“一种钛合金管材织构强度的确定方法、装置及设备”等发明专利，刘守田、李华共同完成“一种冷轧管的内表面清洗方法及在线连续制造方法”发明专利，并共同推进高性能钛管稳定批产和成果产业化。

李恒与朱宝辉围绕钛管冷轧、织构演变及组织性能调控开展合作，与杨恒、楚志兵、刘守田等共同发表“An insight into texture evolution and tailoring during multi-pass cold pilgering of high-strength titanium alloy tubular materials”等论文，形成了高校与企业协同开展高强钛管组织性能调控研究的合作关系。

通过上述合作，项目形成以西北工业大学为技术牵引，联合成飞、西部钛业、中国航空综合技术研究所、太原科技大学、张家港华裕及中色金航钛业等单位，贯通材料制备、成形连接、服役评价与工程应用的产学研用协同创新体系，为项目科技创新和产业化应用提供了持续支撑。