

陕西省科学技术进步奖公示信息

(2025年度)

一、项目基本情况

项目名称	大规格层状金属复合材料制备关键技术及应用
主要完成人	张聪惠；樊科社；李宁；刘帅洋；孙昊；张敏；朱文光；吴江涛；李南南；朱磊；李文升；尚稚轩；张卫刚；宋从斌；宋慷慨
主要完成单位	西安建筑科技大学、西安天力金属复合材料股份有限公司、西安优耐特容器制造有限公司、西安理工大学、中国石油集团工程材料研究院有限公司

二、提名意见（适用于单位提名）

提 名 者	陕西省教育厅	提名等级	<input checked="" type="checkbox"/> 一等奖 <input type="checkbox"/> 二等奖 <input type="checkbox"/> 三等奖
<p>提名意见：</p> <p>聚焦苛刻服役条件对高可靠性大规格层状金属复合材料的重大需求，自 2015 年起，项目团队在国家“863”计划等课题支持下，对大规格层状金属复合材料制备加工关键技术开展产学研用协同攻关，揭示了爆炸焊接界面波状结合机理与碰撞能量分布规律；突破了大规格复合板结合率不高、边部弱结合、超厚复层爆炸复合边界效应控制等瓶颈；研发了低成本、短流程热处理新工艺；形成了高效焊接与界面表征方法；开发了大规格复合材料后处理成形技术与装备；建成大规格层状金属复合板生产线和压力容器制造生产线。解决了全球首座 AP1000 核电机组（三门核电站）用钛/钢复合板、国内首套 150 万吨最大醋酸项目用锆/钢双层复合板、国内低温工程领域（空分、液氮、液氧、LNG、液氢）用铝/钢多层复合板国产化替代材料难题，打破了关键装备的国外技术垄断。</p> <p>共获授权专利 41 件，制定团体标准 1 项、企业标准 5 项，在 Materials Science & Engineering A、Materials Characterization 等期刊发表论文 44 篇。有力推动了大规格层状金属复合材料制备技术进步，显著提高了企业市场竞争力，累计实现新增销售额 12.88 亿元，新增利润 1.3 亿元。产品已成功应用于核电、低温工程、化工、油气勘采等领域，大幅提升了国家重大工程关键材料和装备的国产化水平并解决了国家急需，推动我国高端制造行业的科技进步，经济和社会效益显著。</p> <p>同意推荐该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。</p>			
<p>说明：省科学技术进步奖一、二、三等奖项目，实行按等级标准提名、独立评审表决的机制。提名单者应严格依据省科学技术奖的标准条件，说明提名项目的贡献程度及等级建议。“提名一等奖”评审落选项目不再降格参评二等奖，“提名二等奖”的评审落选项目不再降格参评三等奖。项目组与提名单位沟通后，做出提名等级意见；提名项目正式提交后，提名等级建议不得变更。</p> <p>软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。</p>			

三、项目简介

高可靠性金属复合板是核电、低温工程、油气勘采、精细化工等国家重点工程领域急需的关键材料。近年来，随着国家重大工程装备向结构尺寸大型化、服役条件严苛化方向发展，对装备的安全可靠性提出了更高要求。在此背景下，增大复合板尺寸、减少焊缝数量，已成为提升装备整体安全可靠性的重要途径。然而，随着复合材料尺寸规格不断增大，在复合制备工艺、组织性能综合调控、界面结合机理、高可靠性焊接以及性能质量高效评价等诸多方面，面临一系列严峻技术挑战。

聚焦高压、高温、低温、强腐蚀等苛刻服役条件下大型关键装备对高可靠性大规格层状金属复合材料的重大需求，自 2015 年起，西安建筑科技大学联合西安天力金属复合材料股份有限公司、西安优耐特容器制造有限公司、西安理工大学、中国石油集团工程材料研究院有限公司等单位，在国家“863”计划等相关课题支持下，对大规格层状金属复合材料制备加工关键技术开展产学研用协同攻关和深入研究，揭示了爆炸焊接界面波状结合机理与碰撞能量分布规律；突破了大规格复合板结合率不高、边部弱结合、超厚复层爆炸复合边界效应控制等关键技术瓶颈；研发了低成本、短流程热处理新工艺；形成了大规格复合板高效焊接与界面表征方法；开发了大规格复合材料后处理成形技术与装备；建成大规格层状金属复合板材生产线和层状金属复合板压力容器制造生产线。该项目解决了全球首座 AP1000 核电机组（三门核电站）用钛/钢复合板、国内首套 150 万吨最大醋酸项目（巨正源醋酸）用锆/钢双层复合板、国内低温工程领域（空分、液氮、液氧、液化天然气、液氢）用铝/钢多层复合板国产化替代材料难题，打破了关键装备的国外技术垄断。

该项目的主要技术成果和创新点包括：

1. 揭示了爆炸焊接复合过程金属粒子的运动规律与界面结合机理。采用多维、分段数值模拟方法，首次完整、准确预测了爆炸焊接大规格复合板界面结合过程，追踪金属粒子在强冲击过程中的运动轨迹，揭示了结合界面处波状界面的结合机理，探究了碰撞能量云图分布规律，优化了爆炸复合工艺参数，产品成品率由 92%提高至 99%。

2. 突破了大规格复合板制备技术。发明边部能量补偿的创新布药方式及雷管区面积与边界效应控制方法，有效解决了大规格复合板结合率不高、边部弱结合等行业共性难题；全球首次制备了长度超过 15 米的钛/钢复合板，界面结合率达 99%，结合强度大于 200MPa（标准要求 140MPa），延伸率大于 30%。该产品已成功应用于反应釜、蒸馏塔等大型化工装置及全球最大凝汽器等大型核电机组，综合力学性能达到国际领先水平。

3. 研发了短流程热处理与表面抗氧化技术。针对锆/钢等高温易氧化复合材料，发明由 MoS_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等组成的表面抗氧化剂，提出低成本、短流程热处理工艺，在保证界面结合强度的同时，节约了抽真空时间与惰性气体资源，生产效率提高 30%，成本降低 20%，显著提升了产品的市场竞争力。

4. 开发了高效焊接工艺技术。率先将钛/钢、铝/钢复合板的焊接方式由传统的钢基层采用手工氩弧焊+手工电弧焊+单丝埋弧焊、复层采用手工氩弧焊改进为复合板钢基层(PAW+双丝窄间隙 SAW)、复层柔性自动 TIG 焊，焊缝质量合格率提升至 99%以上，效率提升 4 倍以上。

5. 突破了异质金属焊接材料与接头设计难题。发明钛/钢复合板过渡层对接焊焊丝及其制备方法，突破了钛钢异质金属不能直接熔焊的行业共性技术难题。该技术优化了复合板接头型式，显著降低了压力容器制造成本，同时拓展了产品在海洋工程、石油化工领域的多样化应用场景。

该项目共获授权专利 41 件（其中发明专利 37 件），制定团体标准 1 项、企业标准 5 项，在《Materials Science &Engineering A》《Materials Characterization》等国内外期刊发表学术论文 44 篇，出版教材 1 部。该成果有力推动了大规格层状金属复合材料制备技术的进步，显著提高了企业的市场竞争力，累计实现新增销售额 12.88 亿元，新增利润 1.3 亿元。产品已成功应用于核电、冶金、化工、环保等领域，大幅提升了国家重大工程关键材料和装备的国产化水平，推动我国高端制造行业的科技进步，经济和社会效益显著。基于上述成果，项目团队先后入选“区域关键有色金属先进制备与表面技术”陕西省重点科技创新团队、“爆炸焊接金属复合材料开发创新团队”陕西省重点科技创新团队、“先进轻质合金工业化复合制备技术及产业化”陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍、“超低温用铝合金/不锈钢多层复合板材制备与开发”陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍，成员先后获国家级人才 1 名，陕西省三秦英才特殊支持计划-科技创新领军人才 1 名、陕西省三秦英才特殊支持计划-产业领军人才 1 名、陕西省创新创业人才 1 名、西安市高层次人才-地方领军人才 4 名，《新华网》、《中国石油报》等多家媒体对项目组的科研成果进行了广泛报道。成果曾获 2025 年度陕西高等学校科学技术特等奖。

四、客观评价

1. 科学技术成果评价

2024 年，中国有色金属学会组织同行专家对相关成果进行了评价，中国工程院院士张联盟教授为专家组组长。评价结论为：

该项目针对大规格（超长、超厚）复合材料端部结合质量差，雷管区面积大导致面积结合率偏低，缺少大型热处理装备且成本高、焊接效率低等问题，开展了“大规格层状金属复合材料爆炸复合技术开发及应用”研究。提出了多维、两段数值模拟方法，首次完整、准确预测了大规格爆炸复合板结合过程；发明了超长、超厚复合板端部能量补偿方法及雷管区面积、边界效应控制方法，实现了金属复合材料的高质量复合。国际上率先制备出工程用最长（15m）的单道次爆炸复合钛/钢复合板，结合强度达到 200MPa 以上（标准要求 $\geq 140\text{MPa}$ ），延伸率达到 30% 以上。综合力学性能达到国际领先水平；发明了复合板热处理表面抗氧化剂，相较于真空热处理，生产效率提升 40% 以上，成本降低 50% 以上，实现了大规格复合材料高效、低成本热处理；开发了 PAW+SAW+TIG 高质量焊接组合方法，焊接效率提高 4 倍以上，克服了易形成脆性相、焊接效率低难题，提高了质量稳定性。技术难度大，研究创新程度高，重现性好、成熟度高。提升了国家重大工程关键材料的国产化水平，促进了我国高端制造行业的科技进步。具有良好的经济效益。项目整体技术达到国际先进水平，其中，产品综合力学性能处于国际领先水平。

2. 同行评价

华南理工大学王振民教授在 Journal of Manufacturing Processes 期刊第 88 卷上发表的论文“Effects of welding speed on welding process stability, microstructure and mechanical performance of SUS304 welded by local dry underwater pulsed MIG”引用了代表作“Interfaces of the 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 five-layer composite plate fabricated by explosive welding”，评述了本项目将 SUS304 钢作为海洋平台、船舶用大规格复合板基板的可靠性。

北京理工大学王林教授在 2022 年 Journal of Materials Research and Technology 第 21 卷上发表的论文“Investigation of interfacial structure and dynamic mechanical behavior of titanium alloy laminated composites”引用了代表作“Interfaces of the 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 five-layer composite plate fabricated by explosive welding”，引证了课题组研究的爆炸焊接工艺可以对复合板界面组织结构产生显著影响。

华南理工大学张勤教授在 2023 年 Journal of Materials Processing Technology 第 322 卷上发表的论文“Microstructure and mechanical properties of SUS304 weldments manufactured by ultrasonic vibration assisted local dry underwater welding”引用了代表作“Interfaces of the 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 five-layer composite plate fabricated by explosive welding”，引证了

课题组证明的晶界取向角反映了原子排列规律，这对材料的微观结构特征和性能有很大影响。

法国国立高等工程技术学院的 Benjamin Zielinski 在 2023 年 Journal of Nondestructive Evaluation 第 42 卷上发表的论文“Interface Morphology Description and Quantification of Al-Cu Magnetic Pulse Welding Joints Using X-Ray Micro-computed Tomography”引用了代表作“Interfaces of the 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 five-layer composite plate fabricated by explosive welding”，引证了本课题组五层爆炸焊接方法可以在复合板组元金属界面处产生特定的组织形态。

3. 科技查新

陕西省科委西安建筑科技大学查新工作站对本项目相关成果进行了国内外查新，创新点 1：采用边部能量补偿的创新布药方式，有效解决大规格复合板结合率不高、边部弱结合等难题。检索文献均未涉及利用边部能量补偿的方法，对大规格复合板结合率不高、边部弱结合等难题的研究，与本课题研究方向不同。创新点 2：开发了由 MoS_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等组成的表面抗氧化剂，提出了低成本、短流程热处理工艺。检索文献均未涉及由 MoS_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等组成的表面抗氧化剂的开发研究，与本课题研究内容不同。创新点 3：在行业内率先将金属复合板的焊接方式由传统的手工氩弧焊+手工电弧焊+埋弧焊，改进为等离子弧焊+电弧焊+埋弧焊的高效自动焊接组合方法。检索文献均未涉及将金属复合板的焊接方式由传统的手工氩弧焊+手工电弧焊+埋弧焊改进为等离子弧焊+电弧焊+埋弧焊的高效自动焊接方法研究，与本课题研究方法不同。

总体而言，经检索并对相关文献分析对比结果表明：在国内外公开发表的文献中与本委托项目创新点完全相同的未见报道。

4. 应用评价

应用本项目系列创新技术开发的大规格钛/钢复合板被江苏中圣压力容器装备制造有限公司用于制造全球最大的凝汽器，并应用于全球首座 AP1000 核电机组（三门核电站），助力我国核电事业发展、保障国家能源安全，对于实现“双碳”目标具有重要意义。同时，具有显著的经济社会效益，近三年累积新增产值 14707.9 万元，新增利润 1428.8 万元。

本项目的系列创新技术支撑西安天力金属复合材料股份有限公司成功制备了大规格锆/钢双层复合板，属国内首创，实现了进口替代。产品被南京宝色、森松（江苏）重工等企业用于制精馏塔、蒸馏塔、反应釜等核心设备，并应用于国内年产能最大巨正源醋酸项目（年产 150 万吨）。本项目提供的大规格锆/钢复合板增加了塔器的安全系数以及服役性能，提高了产品的服役寿命和企业的市场竞争力，经济效益显著，近三年累积新增产值 77513.8 万元，新增利润 7520.48 万元。

本项目系列创新技术开发的大规格层状金属复合材料被西安优耐特容器制造有限公司用于制造反应釜、换热器等核心设备，显著提升了产业链自主可控能力。产品价格和工期方面较同类进口产品竞争优势明显，利用其制作的设备应用于新能源、冶金、精细化工等领域，设备投入运营后状态良好，近三年累积新增产值 7038.83 万元，新增利润 681.84 万元。

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

（1）研发历程

针对高可靠性、大规格层状金属复合材料制备加工过程中存在的性能稳定性低、复合成本高、组织性能检测难等行业痛点，在国家“863”计划、国家重点研发计划、国家自然科学基金、陕西省重点研发计划等相关课题支持下，西安建筑科技大学联合西安天力金属复合材料股份有限公司、西安优耐特容器制造有限公司、西安理工大学、中国石油集团工程材料研究院有限公司等单位对大规格层状金属复合材料制备加工关键技术开展产学研用协同攻关和深入研究，揭示了爆炸焊接界面波状结合机理与碰撞能量分布规律；突破了大规格复合板结合率不高、边部弱结合、超厚复层爆炸复合边界效应控制等关键技术瓶颈；研发了低成本、短流程热处理新工艺；形成了大规格复合板高效焊接与界面表征方法；开发了大规格复合材料后处理成形技术与装备。该项目解决了全球首座 AP1000 核电机组（三门核电站）用钛/钢复合板、国内首套 150 万吨最大醋酸项目（巨正源醋酸）用锆/钢双层复合板、国内低温工程领域（空分、液氮、液氧、液化天然气、液氢）用铝/钢多层复合板国产化替代材料难题，打破了关键装备的国外技术垄断。

依托本项目技术建成大规格层状金属复合板材生产线一条，产能可达 2 万吨/年，且产品合格率稳定保持在 99%以上；层状金属复合板压力容器制造生产线一条，产能可达 100 台套/年。制备的钛/钢复合板、铝/钢多层复合板以及锆/钢复合板等产品均已通过项目鉴定，产品综合力学性能达到国际领先水平。其中，钛/钢复合板产品性能优于日本、美国 DMC 等国际标杆企业同类产品。

（2）应用效果

依托本项目技术制备的钛/钢复合板材已完全替代进口，实现了 100%国产化，打破了美、日两国在该产品上对我国的垄断，满足了国内百万千瓦级核电站关键设备用层状金属复合材料的市场需求，应用于全球首座 AP1000 核电机组（三门核电站）。天力公司为核电站凝汽器项目国内唯一复合材料供应商。

依托本项目技术制备的锆/钢复合板材，用于国内年产能最大巨正源醋酸项目（年产 150 万吨），在醋酸、蛋氨酸反应釜制备工程中也得到批量化应用。

依托本项目技术制备的储罐、反应釜、塔器等大型容器，在盐酸、硝酸、醋酸及硫酸等强腐蚀性介质工况中得到广泛应用且稳定运行。

“大规格层状金属复合材料制备关键技术开发及应用”项目完成后，共签订 70 余份合同，销售额超 13 亿元，满足我国核电、低温工程、油气勘采、精细化工等领域对大规格层状金属复合材料的需求。

表 1 主要应用单位情况

应用单位名称	应用技术	应用的 起止时间	单位联系人
森松（江苏）重工有限公司	锆/钢复合板制备技术	2022~2023	沈露铮
利华益利津炼化有限公司	大规格层状金属复合板制备技术	2022~2023	李兴双
江苏中圣压力容器装备制造有限公司	大规格复合板焊接新技术	2020~2022	沈建良
南京宝色股份有限公司	锆/钢复合板制备技术	2020~2023	程航
西安优耐特容器制造有限公司	锆钢复合板制备技术及产业化	2022~2023	成水阳
西安三环石油管材科技有限公司	大规格金属复合管制备技术	2022~2023	李文升
延安嘉盛石油机械有限责任公司	层状金属复合管制备技术	2022~2023	黄岩岗
浙江鸿盛化工有限公司	锆/钢复合板反应釜	2019~2020	成水阳

（3）推广应用前景

针对核电、低温工程、油气、化工等国家战略性行业对关键材料的迫切需求，本项目开发的大规格层状金属复合材料能够有效解决现有单一金属材料在复杂工况下易失效难题，为核电凝汽器、结晶器、换热器、精馏塔、蒸馏塔、反应釜等行业重大设备的制造提供材料保障。有助于推动国家战略性行业设备升级、保障产业安全自主可控，提升国家在全球产业竞争格局中的战略地位。

① 本项目基于数值模拟的焊接窗口优化方法在铝/钛/钢三层爆炸复合板中成功应用，显著降低了试制成本，缩短工艺开发周期，该成果还可为不锈钢/钢，银/钢等复合板制备提供工艺指导。

② 本项目研发的新型抗高温氧化涂层有效防止了锆合金等易氧化复层材料的氧化，提高了产品表面质量，该涂层可推广至钼、钽合金等易高温氧化材料，具有良好的市场应用前景。

③ 本项目开发的高效焊接组合技术：复合板基层焊接采用(PAW+双丝窄间隙 SAW)，复层焊接采用柔性自动 TIG 工艺，显著提高了焊接接头质量与焊接效率，可推广应用于其他中大厚度材料的焊接。

④ 本项目发明了钛/钢、铜/钢复合板过渡层对接焊焊丝及制备方法，突破性解决了异质金属不能直接熔焊的行业共性技术难题，优化了复合板接头型式，显著降低压力设备制造成本。

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	一种铝/铝/钛/镍/不锈钢复合材料用金相腐蚀剂及腐蚀方法	中国	ZL202110326625.7	2021年03月26日	国家知识产权局	西安建筑科技大学	张聪惠, 宋从斌, 朱文光, 肖桂枝, 曾祥康, 何晓梅
2	发明专利	层状金属复合板基板与复板的结合控制方法	中国	ZL201110377540.8	2013年10月23日	国家知识产权局	西安天力金属复合材料股份有限公司	薛治国, 李平仓, 樊科社, 高宝利, 黄杏利, 张宝军, 赵锋, 杨学山, 车宇锋, 李昕昱, 李媛
3	发明专利	一种铝复合板的表面保护方法	中国	ZL201010561243.4	2013年04月3日	国家知识产权局	西安天力金属复合材料股份有限公司	王虎年, 周颖刚, 吴江涛, 薛治国, 魏永, 张宝军, 华先锋, 张文平, 代旭辉, 曹振东, 高建国
4	发明专利	一种高耐蚀性海洋用钛板的制备方法	中国	ZL201910364800.4	2020年11月06日	国家知识产权局	西安建筑科技大学	张聪惠, 张津, 肖桂芝, 何晓梅, 曾祥康
5	发明专利	一种微差爆炸焊接作业结构及方法	中国	ZL201611199200.X	2016年12月22日	国家知识产权局	西安天力金属复合材料股份有限公司	樊科社, 李进军, 吴江涛, 孔宪平, 程会建, 王俊
6	发明专利	一种大型钛制封头复合成型工艺	中国	ZL201210590837.7	2015年08月12日	国家知识产权局	西安优耐特容器制造有限公司	李宁, 叶建林, 董斌, 张成, 焦登宝, 张世忠
7	发明专利	合金钢-不锈钢复合材料过渡层用焊丝及其制备方法	中国	ZL202111645629.8	2023年07月28日	国家知识产权局	西安理工大学	张敏, 刘智博, 郜雅彦, 曹齐鲁, 张志强, 李毅
8	发明专利	钛钢复合结构过渡层用铜-钎基气保护焊丝及其制备方法	中国	ZL202111645642.3	2023年06月30日	国家知识产权局	西安理工大学	张敏, 尚静, 郝琛, 郜雅彦, 李毅, 曹齐鲁

9	论文	Experimental and numerical investigations on the microstructural features and mechanical properties of explosively welded aluminum /titanium/steel trimetallic plate	中国	2024 (209), 113669	2024 年 01 月 15 日	Materials Characterization	西安建筑科技大学	Yongchao Zha, Conghui Zhang, Wenguang Zhu, Xiaomei He, Xiangkang Zeng, Nannan Li, Congbin Song
10	论文	Interfaces of the 5083Al/1060Al/TA1 /Ni/SUS304 five-layer composite plate fabricated by explosive welding	中国	2022(19), 314-331	2022 年 05 月 6 日	Journal of Materials Research and Technology	西安建筑科技大学	Conghui Zhang, Congbin Song, Wenguang Zhu, Chi Ma, Xiangkang Zeng, Xunliang Zhang, Lei Zhu

七、主要完成人情况表

姓 名	张聪惠	排 名	1
行政职务	交叉创新研究院院长		
技术职称	教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 本项目组的学术带头人，是项目研究总体思路的提出者，负责研究计划的制定和实验工作的指导，负责利用多维度数值模拟方法，首次完整、准确预测了爆炸焊接大规格复合板结合过程，揭示了碰撞能量云图、应力场与微观组织演变规律之间的关系。发明了适用于多层金属复合材料界面的金相腐蚀剂及腐蚀方法，有助于探究爆炸复合过程微观组织演变，提高表征效率。对主要技术创新点 1、2、4 做出主要贡献。支撑材料为附件 1-1-1，1-4-1，2-2-1，2-2-4，2-2-5，2-2-6，2-2-7，2-2-11。			

姓 名	樊科社	排 名	2
行政职务	董事长		
技术职称	正高级工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 负责总体试验方案的制定与执行，发明了边部能量补偿的创新布药方式，有效解决大规格复合板结合率不高、边部弱结合等难题；全球首次制备了长度超过 15 米的钛钢复合板，界面结合率达 99%，结合强度大于 200MPa（标准要求 140MPa），延伸率大于 30%。对主要技术创新点 1、2、3 做出贡献。支撑材料为附件 1-1-2，2-2-2，2-2-5。			

姓 名	李宁	排 名	3
行政职务	副总经理		
技术职称	正高级工程师		
工作单位	西安优耐特容器制造有限公司		

完成单位	西安优耐特容器制造有限公司
<p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>负责复合板焊接试验方案的制定与执行，在行业内率先将金属复合板的焊接方式由钛/钢、铝/钛/钢复合板传统的手工焊接改进为钢基层 (PAW+双丝窄间隙 SAW)+复层柔性自动 TIG 焊，并形成企业标准。对主要技术创新点 3、4、5 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-3，2-2-4，2-2-5，2-2-6。</p>	

姓 名	刘帅洋	排 名	4
行政职务	无		
技术职称	讲师		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 分析大规格层状金属复合材料爆炸复合及后续热处理过程中的微观组织演变机制，为基层、复层材料的组织结构设计形成系统理论。对主要技术创新点 1、3 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-4，2-2-6。			

姓 名	孙昊	排 名	5
行政职务	总经理		
技术职称	高级工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 负责爆炸复合板相关试验方案的制定与执行，针对超长复合板爆炸焊接过程中爆炸冲击波能量衰减，发明了大规格爆炸复合材料边部能量补偿新方法，成功制备出面积 36m ² 的钛钢复合板并应用于某大型化工蒸馏塔。对主要技术创新点 1、2 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-4，2-2-6。			

姓 名	张敏	排 名	6
行政职务	无		
技术职称	教授		
工作单位	西安理工大学		
完成单位	西安理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 发明了钛钢复合板过渡层对接焊焊丝及其制备方法，突破性解决了钛钢异质金属不能直接熔焊的行业共性技术难题，优化了复合板接头型式，提高了焊接接头复合板的界面冶金结合，显著降低常压设备制造成本。对主要技术创新点 4、5 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-3，2-2-9，2-2-10。			

姓 名	朱文光	排 名	7
行政职务	无		
技术职称	副教授		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 发明了适用于多层金属复合材料界面的金相腐蚀剂及腐蚀方法，多层复合材料界面的微观组织可被同时观察表征，提高了表征效率。探究了多层复合板界面微观组织演化规律。对主要技术创新点 1、3 做出贡献。支撑材料为附件 1-1-1，2-2-1，2-2-4，2-2-6。			

姓 名	吴江涛	排 名	8
行政职务	副总经理		
技术职称	高级工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		

对本项目技术创造性贡献：

研究了由 MoS_2 、 CaO 、 Al_2O_3 等组成的表面抗氧化剂，提出了低成本、短流程热处理工艺退火工艺，阐明了多层复合板界面的协同控制方法，揭示了结合界面处波状界面的结合机理。对主要技术创新点 1、3 做出贡献。支撑材料为附件 1-1-3，2-2-2，2-2-4，2-2-6。

姓 名	李南南	排 名	9
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		

对本项目技术创造性贡献：

系统研究了 Ti-钢、Al-Ti-钢、Al-Al-Ti-Ni-不锈钢、耐蚀合金-钢等系列爆炸复合材料不同热处理工艺下的界面微观组织演化及其力学性能，建立了 Zr-钢等易氧化复合板低成本、短流程热处理规范。开发了一种能使锆合金复层在非真空气氛下进行热处理，从而保证复合材料后续耐蚀性能的表面保护方法。对主要技术创新点 3 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-4，2-2-6。2-2-11。

姓 名	朱磊	排 名	10
行政职务	总经理助理兼研发创新中心主任		
技术职称	正高级工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		

对本项目技术创造性贡献：

开发一种结构简单、设计合理的金属板材校平装置及相关方法，温校后，板材(厚度>30mm)不平度 $\leq 3\text{mm/m}$ ，远高于国家标准 ($\leq 6\text{mm/m}$ GB/T8547-2019)，控形效率提高 50%。以 TC4 钛合金/304 不锈钢复合板为例，新型校平装置与工艺参数设计可以实现复合板不平度和扭曲度的大幅降低，同时复合板界面结合强度无明显损失。对主要技术创新点 1、2、3 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-1，2-2-5。

姓 名	李文升	排 名	11
行政职务	无		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国石油集团工程材料研究院有限公司		
完成单位	中国石油集团工程材料研究院有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 确立复合板焊接参数以及材料物理及力学性能参数，进行焊接有限元模拟，分析焊接接头应力应变分布规律，基于不同服役环境复合板基体与复层协同变形差异性，制定复层结构设计评价准则。对主要技术创新点 4、5 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-4，2-2-6。			

姓 名	尚稚轩	排 名	12
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 针对超厚多层复合板爆炸复合过程中雷管区面积和边界效应大的问题，根据金属的塑韧性、抗冲击能力，确定炸药能量进而确定雷管区面积，保证金属在不发生断裂的情况下，将雷管区面积最小化。实现了超厚复合板的界面的冶金结合。对主要技术创新点 1、2 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-4，2-2-6。			

姓 名	张卫刚	排 名	13
行政职务	总经理		
技术职称	高级工程师		
工作单位	西安优耐特容器制造有限公司		
完成单位	西安优耐特容器制造有限公司		

对本项目技术创造性贡献：

确立复合板焊接参数以及材料物理及力学性能参数，进行焊接有限元模拟，分析焊接接头应力应变分布规律，分析复合板焊接接头形式对焊接结构的影响规律。对主要技术创新点 4、5 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-4，2-2-6。

姓 名	宋从斌	排 名	14
行政职务	无		
技术职称	工程师		
工作单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
完成单位	西安天力金属复合材料股份有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 系统对比不同爆炸复合工艺制备的铝钢五层材料界面微观结构、力学性能及残余应力分布，分析热处理制度对界面化合物种类与形态、剪切/拉伸性能、耐腐蚀性及后续机加成品服役性能的演化规律，优化复合工艺与热处理技术，对主要技术创新点 2 做出贡献。支撑材料为附件 2-2-1，2-2-11。			

姓 名	宋慷慨	排 名	15
行政职务	无		
技术职称	无		
工作单位	西安建筑科技大学		
完成单位	西安建筑科技大学		
对本项目技术创造性贡献： 系统研究了 Al-Ti-钢、Ti-钢、Zr-钢、Al-Al-Ti-Ni-不锈钢、耐蚀合金-钢等系列爆炸复合材料微观组织演化规律，为爆炸复合材料制备工艺优化提供了理论指导。对主要技术创新点 1、3 做出贡献。			

八、主要完成单位情况表

单位名称	西安建筑科技大学
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>项目主体负责单位，负责本项目的顶层设计、技术论证、组织协调。主要负责创新点 1 的研究工作。利用多维度数值模拟方法，首次完整、准确预测了爆炸焊接大规格复合板结合过程，揭示了碰撞能量云图、应力场与微观组织演变规律之间的关系。具体包括：</p> <ul style="list-style-type: none"> （1） 利用多维度数值模拟方法预测复合板结合过程； （2） 结合数值模拟结果与现场实际，确定爆炸焊接加工窗口； （3） 揭示了爆炸复合过程微观组织演变。 	

单位名称	西安天力金属复合材料股份有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>项目主要成员单位，主要负责创新点 2 的研究工作，发明了大规格复合材料爆炸复合及后处理关键技术。提出了大幅面能量补偿方法，有效解决了大规格复合板结合率不高、边部弱结合等难题，率先制备出长度超过 15 米的钛钢复合板。开发了新型抗氧化涂料，提出了低成本、短流程热处理工艺。具体包括：</p> <ul style="list-style-type: none"> （1） 发明了大规格爆炸复合材料边部能量补偿新方法； （2） 开发了大规格复合板热处理工艺及抗氧化涂层； （3） 发明了复合材料控形与界面氦检漏新技术。 	

单位名称	西安优耐特容器制造有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>项目主要成员单位，主要开展创新点 3 的研究工作，在行业内率先将金属复合板的焊接方式由钛/钢、锆/钛/钢复合板传统的手工焊接改进为钢基层 (PAW+双丝窄间隙 SAW)+复层柔性自动 TIG 焊。具体包括：</p> <p>(1) 复层材料焊缝结构优化；</p> <p>(2) PAW+SAW+TIG 高效组合焊接方法。</p>	

单位名称	西安理工大学
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>项目主要参与单位，负责创新点 1 和创新点 2 的部分研究工作，主要贡献如下：</p> <p>(1) 系统研究系列爆炸复合材料不同热处理工艺下的界面微观组织演化及其力学性能；</p> <p>(2) 发明了一种钛钢复合板过渡层对接焊焊丝及制备方法。</p>	

单位名称	中国石油集团工程材料研究院有限公司
<p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>项目的主要成员单位，负责创新点 3 的研究工作。主要贡献如下：</p> <p>(1) 开发了爆炸复合制坯和一体化热处理调控制备技术，专注复合板焊缝质量控制问题。对主要技术创新点 3 做出贡献。</p>	

完成人合作关系说明

完成人张聪惠为本项目负责人，与完成人李南南、朱磊、朱文光、宋从斌、宋慷慨是本项目多篇论文的主要作者，具有论文合著关系。

完成人朱磊与尚稚轩是本项目论文的主要作者，具有论文合著关系。

完成人张聪惠与朱文光，樊科社与吴江涛是本项目专利的主要发明人，具有共同知识产权关系。

完成人张聪惠、朱磊、樊科社、李宁共同完成了省重点研发项目，具有共同立项的合作关系。

完成人李宁与张敏共同完成了复合板焊接接头的有限元模拟与实验验证，具有产业合作关系。

完成人张聪惠、李宁、朱文光、孙昊、李南南、刘帅洋、李文升、尚稚轩、张卫刚共同完成了陕西省教育厅科学技术研究优秀成果特等奖。

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	证明材料
1	论文合著	张聪惠 1/李南南 9/朱磊 10/宋慷慨 15	2023 年	2023 年	退火温度对 1060Al/TA2/CCSB 爆炸复合板结合界面微观组织与力学性能的影响	未列入附件
2	论文合著	张聪惠 1/朱文光 7/李南南 9/朱磊 10/宋从斌 14	2023 年	2023 年	5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 五层爆炸复合板退火组织演化及力学性能	未列入附件
3	论文合著	张聪惠 1/朱文光 7/朱磊 10/宋从斌 14	2022 年	2022 年	Interfaces of the 5083Al/1060Al/TA1/Ni/SUS304 five-layer composite plate fabricated by explosive welding	附件 2-2-1
4	论文合著	朱磊 10/尚稚轩 12	2022 年	2022 年	铝 / 不锈钢复合板界面形态及性能分析	未列入附件
5	共同知识产权	张聪惠 1/朱文光 7/宋从斌 14	2022 年	2022 年	一种铝/铝/钛/镍/不锈钢复合材料用金相腐蚀剂及腐蚀方法	附件 1-1-1
6	共同知识产权	樊科社 2/吴江涛 8	2022 年	2022 年	一种微差爆炸焊接作业结构及方法	附件 2-2-2
7	产业合作	李宁 3/张敏 6	2015 年	2015 年	钛/钢复合板焊接有限元计算及接头性能研究	附件 2-2-3
8	其他	张聪惠 1/李宁 3/刘帅洋 4/孙昊 5/朱文光 7/李南南 9/李文升 11/尚稚轩 12/张卫刚 13	2023 年	2024 年	教育厅科学技术研究优秀成果特等奖	附件 2-2-4
9	共同立项	张聪惠 1/樊科社 2/李宁 3/朱磊 10	2019 年	2022 年	大规格钛基复合材料爆炸复合、焊接与表面强化技术研发	附件 2-2-5

