（科技进步奖 提名号 309-4037）

一、项目名称

高端煤机装备激光再制造关键技术创新与应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省煤炭学会

提名意见：

“高端煤机装备激光再制造关键技术创新与应用”项目面向煤炭工业绿色智能化转型与煤机装备高端化升级需求，聚焦综采“三机”核心部件长寿命表面强化制造行业共性难题，创新构建“材料开发-工艺优化-装备研制-智能管控”全链条激光熔覆制高端煤机装备技术体系，攻克了长尺寸油缸表面制造尺寸精度难控、采煤机滚筒强冲击下强韧性匹配不足、刮板机中部槽大面积熔覆质量波动大、批量熔覆过程质量管控能力薄弱的技术瓶颈。项目突破液压支架立柱 Fe 基非晶高速激光熔覆延寿技术，实现长尺寸构件一体化成形与耐磨耐蚀协同提升；开发多波凸轮激振辅助陶瓷-金属复合滚筒熔覆技术，实现涂层组织细化、缺陷抑制与强韧性同步提升；研发刮板输送机中部槽激光熔覆组织均质化振动调控技术与专用装备，显著提升中部槽熔覆质量稳定性与服役寿命；研发“在线监测-智能预测-工艺寻优”一体化激光熔覆成形质量管控系统，为煤机装备激光熔覆规模化、稳定化制造提供智能化技术支撑。项目形成覆盖新品强化与在役修复的成套技术方案，成果已在西安重装铜川、蒲白煤矿机械等企业及矿区

推广应用，满足煤机核心部件长寿命高性能制造需求，经济与社会效益显著。

提名成果材料齐全规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

煤炭是陕西乃至全国能源稳定供给的“压舱石”，其产业链持续作为陕西省重点工业产业链，发展高端煤机装备是培育能源领域新质生产力的迫切需求。另一方面，煤炭井下开采作业环境恶劣：空间受限、粉尘浓度高、工况复杂多变、安全风险突出，造成现有表面制造下的基础关键部件服役寿命短、环保属性差，已无法支撑高端煤机装备在“智能高效驱动、绿色低碳赋能、全链增值发展”的现代化能源产业转型需求，进而成为制约煤炭行业安全高效与绿色智能开采的重大共性难题。激光制造是高端煤机装备补链、强链、延链的关键核心技术。高端煤机装备长期在恶劣的井下环境中服役，要求表面性能必须具备高强度、高耐磨性、抗腐蚀性和耐冲击性。传统表面制造（包括：电镀、喷涂、常规激光熔覆等）普遍存在熔覆均匀性难控、强冲击工况涂层强韧性难以匹配、大面积构件熔覆质量波动大、过程管控智能化程度低等行业共性难题，本项目创新构建了“材料-工艺-装备-智能管控”的高端煤机装备激光制造形状、性能调控技术体系，攻克了液压支架立柱激光再制尺寸精度控制、采煤机滚筒振动辅助熔覆强韧

化、刮板机中部槽振动辅助均质化制造、熔覆过程智能质量管控关键技术，实现煤机“三机”核心部件激光制造的材料高性能化、工艺标准化、装备专用化、管控智能化。相关技术可应用于新品表面批量强化与在役构件高质量修复，显著提升部件服役寿命与生产效率。

主要创新点如下：

1.提出“仿真优化-性能协同-一体成形”的液压支架立柱 Fe 基非晶高速激光熔覆延寿技术。针对液压支架立柱长尺寸外圆构件高速熔覆成形均匀性难控、性能匹配性差的技术难题，研发 Y 掺杂 Fe 基非晶熔覆粉末材料体系，提出微观组织精准调控方法，实现涂层非晶含量大于 85%，井下腐蚀速率低至 152g/(m^2·a)；构建高速激光熔覆温度场-流场多场耦合有限元模型，形成数值模拟与实验验证相结合的工艺优化方法，熔覆层缺陷率降低 40%以上，工艺优化效率提升 60%；开发长尺寸外圆表面激光熔覆与后处理一体化成形装备，攻克大尺寸立柱熔覆均匀性差、工序脱节的难题，应用后立柱服役寿命较传统电镀提升 1 倍以上。

2.攻克悬臂梁式高频微幅振动辅助激光熔覆陶瓷-金属复合滚筒制造技术。针对采煤机滚筒强冲击磨损工况下常规熔覆涂层缺陷多、强韧性匹配不足的行业痛点，开发耐磨抗冲击陶瓷-金属复合粉末材料，构建成分-相结构-服役性能的调控关系链，涂层磨损率降低 95%，冲击韧性提升 19.1%；提出振动场驱动的熔池凝固组织调控与强韧化方法，突破冶金缺陷协同抑制关键技

术，涂层缺陷率降低80%以上，硬度与韧性实现同步提升；自主研制多波凸轮驱动悬臂梁式高频微幅激振装备，可稳定输出800Hz/50μm高频微幅振动，成套技术应用后滚筒服役寿命提升33%。

3.研发刮板输送机中部槽激光熔覆组织均质化的振动调控技术与专用装备。针对中部槽磨损-冲击耦合工况下涂层适配性差、大面积熔覆质量波动大、专用激振装备缺失的技术瓶颈，研发CoCrFeNiMoNbTi系高熵合金专用涂层体系，配套预置粉末熔覆工艺与梯度时效后处理，实现涂层硬度大于600Hv、磨损率较基体减少84%、 断裂伸长率达15%；开发高频微幅振动辅助熔覆工艺，利用振动搅拌效应均质元素、破碎枝晶、抑制缺陷，保障熔覆质量一致性；研制基于钢球抛落原理的高频微幅激振器，可稳定输出1200Hz、5~50μm的二维振动，攻克中部槽振动辅助熔覆的装备适配难题，提升中部槽服役寿命与整机大修周期。

4.构建“在线监测-智能预测-工艺寻优”一体化的激光熔覆成形质量管控系统。对矿山装备激光熔覆熔池状态难感知、工艺优化依赖试错、批量成形稳定性不足的共性难题，搭建集机器视觉、红外测温于一体的熔池多参量在线监测平台，研发图像处理算法，精准提取熔池关键特征参数，特征提取平均误差低至4.17%；构建遗传算法优化BP神经网络的成形质量预测模型，开发工艺参数寻优系统，熔宽、熔深等核心指标预测平均相对误差低于

5%，实现工艺参数全局智能寻优，熔覆层缺陷率降低50%，为煤机装备激光熔覆规模化、稳定化制造提供智能化技术支撑。

项目获得授权发明专利26项，计算机软件著作权4项，标准1项，发表高水平学术论文25篇；校企联合培养博士研究生3名、硕士研究生15名。本项目技术已在西安重装铜川煤机、西安重装蒲白煤机等行业骨干企业实现规模化应用，全面覆盖液压支架立柱、采煤机滚筒、刮板输送机中部槽等核心部件，推广至陕煤集团铜川矿业、彬长矿业、黄陵矿业等多个主力矿区。现场应用表明，熔覆强化部件平均服役寿命较传统电镀、堆焊工艺提升40%以上，设备故障率降低35%，显著提升了产品市场竞争力与矿井生产效率。2023-2025年，应用企业依托项目成果累计新增产品销售额约 31.03亿元，新增利润约2.51亿元。

本项目有效解决了传统激光再制涂层易开裂、质量难控的行业痛点，大幅降低井下设备故障发生率，筑牢煤矿安全生产屏障；激光熔覆强化与修复制造较新品制造节材70%以上、减少碳排放约 60%，契合循环经济发展理念，助力煤炭行业绿色低碳转型。相关技术可向工程机械、冶金装备、石油钻采等重载耐磨部件表面强化与修复制造领域延伸辐射，行业示范效应显著，推广应用前景广阔。

四、客观评价

1.鉴定结论

陕西省煤炭学会技术鉴定结论：本项目针对煤矿综采“三机”

核心部件服役工况恶劣、传统修复工艺环保性差、涂层寿命短、质量一致性不足的行业共性问题，研发了适配煤机高端核心部件的激光熔覆形性调控技术及成套系统，可全面提升液压支架立柱、采煤机滚筒、刮板输送机中部槽等部件的再制造质量与服役寿命，有效降低装备全生命周期运维成本，推动煤炭行业绿色低碳转型。项目成果总体达到国际先进水平，其中在振动辅助激光熔覆形性调控方面达到国际领先水平，同意通过鉴定。

（1）研发了耐蚀耐磨铁基非晶粉末、陶瓷-金属复合粉末、高熵合金粉末与制备技术，揭示了合金成分及熔覆工艺对涂层组织的调控机制，显著提高了涂层耐蚀及耐磨性能。

（2）开发了煤机装备圆柱形长尺寸部件高速激光熔覆一体化成形及性能调控技术，研制了高速激光熔覆-后处理一体化成形装备，实现了液压支架立柱等构件的高效高精度修复。

（3）研制了采煤机、刮板机易损部件振动辅助激光熔覆专用设备，开发了振动辅助激光熔覆工艺，提升了采煤机滚筒、刮板机中部槽和链轮等易损部件修复质量与耐久性。

（4）构建了“材料-工艺-装备-监测”全链条技术体系，开发了集“材料数据库、工艺智能匹配、熔覆过程实时监测与成形尺寸在线评测”于一体的煤机装备“三机”易损部件再制造监测专用系统，提高了激光再制造质量及效率。

2.国内外相关技术的比较

对比项	久益环球采矿设备有限公司	宁夏天地奔牛实业集团有限公司	西安重工装备制造集团/中国矿业大学（本项目）	比较结果

专用熔覆材料体系	采用常规电镀、堆焊修复工艺，涂层耐磨耐蚀性有限	采用普通铁基合金激光熔覆工艺，涂层性能提升幅度有限，非晶相占比低	自主开发Y 掺杂Fe 基非晶、陶瓷-金属复合、耐磨高熵三类专用粉末；立柱涂层非晶含量≥ 85%，腐蚀速率大幅下降，中部槽涂层耐磨性能提升84%	国际先进
长尺寸构件一体化成形工艺	无立柱专用一体化熔覆设备，分段加工同轴度误差大	分体式熔覆、后处理设备，工序割裂，立柱厚度均匀性差	研发长外圆“熔覆-滚压-车削”一体化装备，一次装夹成型，涂层厚度偏差≤±9%，解决大立柱均匀性难题	国际先进
振动辅助熔覆技术	无专用振动辅助熔覆装备，采用常规激光熔覆工艺	无专用振动辅助熔覆装备，依赖常规熔覆工艺修复易损部件	研制多波凸轮驱动悬臂梁式高频微幅激振系统，形成采煤机滚筒、刮板机中部槽振动辅助熔覆工艺，服役寿命提升33%	国际领先
智能熔覆管控技术	依赖人工经验调试参数，质量波动大	依赖人工设定工艺参数，缺乏熔池在线监测手段	搭建熔池多模态监测平台，研发遗传算法优化 BP 神经网络预测模型，实现参数智能寻优	国际先进

3.媒体报道及学术性评价

本项目针对煤矿综采“三机”装备激光熔覆强化制造开展技术攻关，产出系列高水平学术成果，理论创新与工程价值得到学界同行普遍认可，团队技术贡献也获得行业权威奖项与国家级科技媒体肯定：

（1）学术层面，截至 2025 年 12 月，项目累计发表学术论文 25 篇（SCI/EI 收录 20 篇），获得授权发明专利 26 项，登记软件著作权 4 项，制修订行业标准 1 项。代表性成果刊发于中国工程院院刊《Engineering》、《Surface & Coatings Technology》及《中国机械工程》等权威期刊，其中 4 篇论文获得高被引，1 篇论文被评为中国精品科技期刊顶尖学术论文 F5000，为三类核心涂层材料开发、振动调控等技术创新提供了扎实理论支撑，获

国内外同行广泛认可。

（2）行业与媒体层面，2024 年 1 月，第一完成人程延海教授凭借在煤矿智能化装备领域的突出贡献，当选煤矿智能化创新联盟联合行业权威期刊设立的“2023 年全国煤矿智能化卓越专家”，彰显了项目成果的行业示范价值。2023 年 12 月 26 日，《科技日报》专题报道程延海团队发表于《Engineering》的高熵合金研究成果，项目前沿基础研究获得国家级科技媒体的认可与传播。

4.科技查新情况

经教育部科技查新工作站（G04）检索 ， 科技查新报告编号：202636000G040181，国内外查新表明，基于成果所涉及的各创新点，目前在国内外所查文献中，除委托单位发表成果外，未见相同报道。

（1）文献分别涉及：铁基非晶合金粉末制备及激光熔覆应用、铁基非晶熔覆层微观组织与耐磨耐蚀性能研究等内容。未见明确述及设计钇掺杂“铁-铬-钼-硼-硅-钇”多元铁基非晶合金体系，并配套高速激光熔覆制备非晶含量≥85%、腐蚀失重速率仅为基体 7%的高性能涂层的研究报道。

（2）文献分别涉及：液压支架立柱激光熔覆修复技术、高速激光熔覆温度场-流场数值模拟、激光熔覆与车削复合加工工艺等内容。未见明确述及构建考虑马兰戈尼对流的高速激光熔覆多场耦合仿真模型，并研发“熔覆-车削-滚压”一体化复合成形工

艺，实现长尺寸构件熔覆厚度均匀性偏差≤±10%的研究报道。

（3）文献分别涉及：超声/机械振动辅助激光熔覆工艺、振动对熔覆层组织与性能的影响机制、振动辅助熔覆装置设计等内容。未见明确述及研制多波凸轮激励悬臂梁式激振系统，振幅1~150μm 连续可调、最大激振力≥4kN，并形成煤机核心部件振动辅助熔覆再制造工艺、实现滚筒寿命提升 33%的研究报道。

（4）文献分别涉及：基于机器视觉的激光熔覆熔池监测、BP 神经网络熔覆层质量预测、遗传算法优化神经网络模型等内容。未见明确述及搭建煤机再制造形貌-温度-振动多模态同步监测平台，开发熔池图像处理算法与遗传优化 BP 神经网络预测模型，并集成为套智能化再制造系统的研究报道。

五、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	发明专利	长尺寸外圆表面高速激光熔覆及后处理装置与方法	中国	ZL 202010563676.7	2022.05.27	5186252	中国矿业大学	程延海，杨文辉，于海航，韩正铜，杨金勇
2	发明专利	一种大尺寸工件高频微幅振动辅助激光熔覆装置及方法	中国	ZL 202311643915.X	2024.07.12	7187315	中国矿业大学	程延海，陈月玮，陈浩，叶强，杨金勇
3	发明专利	一种煤矿刮板输送机中部槽用高熵合	中国	ZL 202311575058.4	2023.11.24	6709807	山西海诚智能制造有限公司，西安重装蒲白煤	苏乐，程永军，徐峰，刘文义，孟凡莹，杨雄伟，

		金涂层及制备方法					矿机械有限公司，陕西理工大学	王萌，谢依林
4	发明专利	一种盾构机刀具表面自润滑硬质复合涂层的制备方法	中国	ZL 202110885224.5	2022.08.26	5413342	中国矿业大学，徐州蓝紫检测技术研究院有限公司	周嘉利，程延海，韩正铜，杨金勇，王情情，陈浩，韩忠臣
5	发明专利	一种梯度复合非晶铁基涂层及其制备方法	中国	ZL 202110883412.4	2023.05.19	5979789	西安交通大学，西安重装铜川煤矿机械有限公司	王豫跃，牛强，张景纯，杨冠军，李长久
6	发明专利	一种超高速激光熔覆铁基非晶涂层的制备方法	中国	ZL 202110883394.X	2023.01.13	5694411	西安交通大学，西安重装铜川煤矿机械有限公司	王豫跃，牛强，张景纯，杨冠军，李长久
7	发明专利	一种中部槽合金涂层及其激光熔覆工艺	中国	ZL 202311364357.3	2023.12.22	6577780	山西海诚智能制造有限公司，西安重装蒲白煤矿机械有限公司	苏乐，徐峰，刘文义，孟凡莹，王欢乐，翟莉娜，张天亮，谢渭莉
8	发明专利	一种用于中大型工件振动辅助激光熔覆的高频微幅激振器	中国	ZL 202311650508.1	2025.12.16	8575977	中国矿业大学	程延海，陈浩，叶强，陈月玮，杨金勇
9	软件著作权	深部矿山智能钻采机器人维保专家数据库系统V1.0	中国	2024SR1600486	2024.10.24	14004359	中国矿业大学	程延海
10	标准	再制造液压支架技	中国	NB/T 11265-2	2023.11.22		淮北矿业股份有限公	葛春贵，梁国治，任祥军，

		术要求		023	6		司，山东能源重型装备制造集团有限公司，安徽省煤炭科学研究院，安徽新华学院，中国矿业大学，国能神东煤炭集团设备维修中心，安徽理工大学，	朱乐章，黄如杭，陈贵，汪青，戴昭斌，戴习奎，李卫龙，杨道召，张灿明，陈潇，孙秀柱，王亚军，王忠宾，罗宇，刘鹏，曹成铭，张彬，程延海，王建文，李刚，聂建伟，张同鑫，夏晨阳，张奋奋，王亚文，赵磊，刘凯，张文炀，赵志梅

六、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
程延海	1	所长	教授	中国矿业大学	中国矿业大学	主持制定项目总体方案与攻关路线
杨强来	2	副总经理	高级工程师	西安重工装备制造集团有限公司	西安重工装备制造集团有限公司	负责项目工程化落地与产业化推广
周嘉利	3	无	助理研究员	中国矿业大学	中国矿业大学	振动辅助激光熔覆研究
崔然	4	无	助理研究员	清华大学	清华大学	激光熔覆一体化成形工艺及调控技术研究
苏乐	5	副总经理	高级工程师	西安重工装备制造集团有限公司	西安重工装备制造集团有限公司	项目方案审核
王豫跃	6	无	副教授	西安交通大学	西安交通大学	智能化再制造系统开发
程永军	7	董事长	高级工程师	西安重装蒲白煤矿机械有限	西安重装蒲白煤矿机械有限	方案优化、应用验证

				公司	公司	
宋晓军	8	董事长	正高级工程师	西安重装铜川煤矿机械有限公司	西安重装铜川煤矿机械有限公司	方案优化、应用验证
王家乐	9	无	助理研究员	中国矿业大学	中国矿业大学	系统测试
杨雄伟	10	主任	助理工程师	西安重装铜川煤矿机械有限公司	西安重装铜川煤矿机械有限公司	项目现场实施

七、主要完成单位情况：

1.西安重工装备制造集团有限公司

西安重工装备制造集团有限公司是国内煤机装备全产业链龙头企业，隶属于陕煤集团，具备综采“三机”整机研发、核心部件精密制造、在役装备绿色再制造一体化服务能力，建有多条规模化激光表面强化自动化生产线，是国内煤机绿色再制造产业的核心推动者与行业标准的重要参与制定单位。公司产业覆盖液压支架、刮板输送机、掘进装备等全品类综采装备，服务国内上百座千万吨级主力矿井，具备年产千套级综采装备与万件级核心部件再制造的产能支撑，工程化落地能力行业领先。作为项目产业牵头单位，公司全面统筹技术成果的工程化转化与商业化推广，牵头制定量产技术路线、市场落地方案与全周期实施计划，统筹铜川煤机、蒲白煤机等生产单元完成 3 条专用激光制造产线的搭建、工艺适配与量产调试。公司聚焦产业端批量生产的核心痛点，牵头建立量产全流程质量管控体系与检验规范，破解大尺寸构件批量激光制造一致性管控、生产效率提升、综合成本控制等多项工程难题；推动成套技术同步覆盖新品表面强化与在役构件再制造两大应用场景，相关激光制造产品已应用于国内 20 余

座主力矿井，累计实现各类激光制造核心部件交付超 1.2 万件，形成了可复制、可推广的煤机绿色激光制造及再制造产业范式。

2.中国矿业大学

中国矿业大学是教育部直属重点高校，拥有智能采矿装备技术全国重点实验室、矿山智能采掘装备省部共建协同创新中心，在全国矿山机械和工程机械领域具有较强的影响力，是国内高端煤机装备绿色制造以及再制造系统设计、综合试验、性能检测于一体的综合性科技创新平台，已成为煤机装备研究开发的重要基地之一。作为项目核心技术研发单位，学校主持制定整体研发方案与“材料- 工艺- 装备- 系统”技术路线，统筹协调各参研单位开展联合攻关，主导四项核心创新点的系统攻关。针对煤矿大尺寸煤机构件高速熔覆成形一致性差、强韧性难以匹配、过程质量难以实时管控等工程难题，学校突破长尺寸外圆高速熔覆均匀性控制、多波凸轮悬臂梁激振、钢球抛落式二维激振等核心装备技术，自主研发熔池多参量在线监测与智能质量管控系统，实现熔覆过程关键信号实时采集、缺陷预判与工艺动态调控，有效改善熔覆层组织状态，提升构件在冲击磨损耦合工况下的服役可靠性。牵头产出授权发明专利 4 件、软件著作权 1 项，参与制定行业标准 1 项，发表 SCI/EI 收录论文 15 篇，形成完整的基础理论、工艺方法与装备原型。学校充分发挥产学研纽带作用，搭建产学研协同创新平台，开展多轮模拟试验、工况适配验证，把实验室技术与矿井实际生产需求紧密结合，为项目提供全链条理论、工

艺与技术支撑，助力各项技术成果向工程样机、批量生产转化，积极推动成套技术成果向煤炭开采转化应用。

3.清华大学

清华大学是中国著名的高等学府，材料学院是国内高端制造与再制造领域的顶尖教学研究单位，拥有国际先进的数值仿真与智能制造研究平台，在激光加工多物理场耦合仿真、快速凝固组织演化、制造过程智能优化方向积淀深厚。学校长期承担高端制造与再制造领域国家级基础研究项目，理论成果持续引领国内激光再制造的基础研究方向，具备极强的前沿理论赋能能力。针对高端煤机装备激光制造过程中组织性能难以精准调控的技术瓶颈，参与团队面向项目三类核心部件的激光熔覆制造需求，系统开展快速凝固条件下激光制造组织演化规律及形成机制研究。通过构建高速激光熔覆温度场-流场多场耦合高精度有限元模型，揭示熔池形核、长大、相变及缺陷演化行为，阐明工艺参数—热过程—组织结构—服役性能的内在耦合关系，深化了对快速凝固条件下再制造组织非平衡演化机制的认识。在此基础上构建工艺参数、组织特征与性能响应的关联分析框架，参与研发熔覆质量智能预测模型，实现多工艺参数全局智能寻优，将传统“试错式”工艺开发效率提升60%以上，熔覆层核心成形指标预测误差低于5%。相关成果推动煤机再制造技术由“恢复尺寸和功能”向“组织可控、性能可设计、寿命可预测”转变，为项目熔覆工艺设计、组织精准调控和性能优化提供了核心科学依据与理论支撑。

4.西安交通大学

西安交通大学是国内表面工程与非晶合金材料领域的权威研究单位，在非晶涂层、高性能表面强化材料方向深耕二十余年，主持多项国家级表面工程领域科研项目，相关研究成果多次荣获省部级科技奖励，学术影响力处于行业前列，是我国非晶涂层技术的重要发源地之一。学校承担液压支架立柱 Fe 基非晶涂层材料的核心研发任务，针对煤矿井下高矿化度水蚀、煤岩磨料磨损与交变冲击载荷耦合的复杂服役工况，围绕传统电镀、普通熔覆涂层耐蚀耐磨协同性不足、界面结合强度低、易剥落失效的行业共性痛点，系统开展非晶涂层材料体系设计与高速激光熔覆制备技术攻关。创新设计梯度复合非晶铁基涂层体系，通过成分梯度设计缓解涂层与基体的性能突变，显著提升界面结合强度与抗冲击韧性。针对高速熔覆过程中非晶相难以稳定保留、长尺寸构件微观组织调控难度大的技术瓶颈，揭示高速熔覆热过程与熔池凝固组织的演化规律，阐明工艺参数对非晶相占比、缺陷生成的作用机制，通过成分-工艺协同优化攻克了大尺寸构件高速熔覆条件下非晶涂层均匀制备的难题，实现了涂层耐磨与耐蚀性能的协同提升。相关研究成果获授权发明专利 2 件，形成了从材料设计、工艺优化到性能评价的完整技术体系，为本项目立柱高速熔覆延寿技术提供了核心材料支撑与理论方法，也为煤机其他核心易损部件的非晶涂层强化应用提供了可复用的技术范式。

5.西安重装蒲白煤矿机械有限公司

西安重装铜川煤矿机械有限公司是国内液压支架整机制造与绿色再制造核心骨干企业，拥有完备的零部件加工、激光制造强化及装备再制造生产线，年立柱修复产能5000余根，是西北地区重要的煤机装备研发生产与产业化示范基地，具备成熟的工艺落地、批量生产与市场推广能力。公司深度参与项目核心工艺迭代与技术落地，攻克煤机部件激光制造成套产业化技术，替代传统激光熔覆，大幅提升液压支架立柱、千斤顶的耐磨耐蚀性能，解决传统装备井下易损耗、失效频发的行业痛点。同时构建ZY、ZF、ZQ多型号标准化液压支架产品体系，适配井下各类支护作业场景，实现复杂工况下装备定制化、系列化配套。落地熔池多模态智能监测技术，建成激光制造全流程智能管控体系，有效稳定加工工艺、提升产品可靠性，从源头降低煤矿设备故障与非计划停机风险。公司依托项目技术开展应用推广与产业化并实现规模化落地，2023—2025年深耕陕煤集团内部数十座重点矿井，同时开拓宁夏、贵州等省外市场及海外配套项目，实现技术跨区域推广应用。近三年依托本项目技术累计新增产值15.1亿元、实现利润7370万元，产业化成效显著。项目技术大幅降低矿区设备采购与运维成本，缩短装备检修停机周期、提升设备周转利用率，有效保障煤矿安全生产、实现矿区降本增效。经过三年市场验证，成套技术工艺成熟稳定，可为煤炭行业煤机装备绿色化、智能化、长寿命升级提供可复制的产业化解决方案。

6.西安重装铜川煤矿机械有限公司

西安重装蒲白煤矿机械有限公司是专注于刮板输送机制造与再制造的专业化生产企业，拥有中部槽自动化激光制造、再制造与精密加工成套产线，具备年产重型中部槽 3 万节的制造能力，是陕煤体系内核心的中部槽再制造与表面强化生产基地，在中部槽批量制造与质量管控方面拥有丰富的产业经验。公司承担中部槽激光制造技术的批量制造与工艺落地工作，完成高频微幅振动辅助熔覆产线的搭建与生产调试，适配高熵合金涂层预置粉末法熔覆工艺与梯度时效后处理流程，攻克大面积中部槽批量激光制造质量稳定性控制难题。通过工艺优化，公司实现中部槽熔覆层缺陷率降低 60%、性能离散度降低 45%，累计产出激光制造中部槽超 8000 节并完成井下工业应用，长期跟踪产品服役状态，持续优化生产工艺与成本方案，推动中部槽熔覆技术实现工业化批量应用。

7.西安煤矿机械有限公司

西安煤矿机械有限公司是我国采煤机设计制造的大型骨干企业，拥有国家能源煤矿采掘机械装备研发（实验）中心、博士后科研工作站、陕西省煤矿机电工程技术研究中心、院士专家工作站。公司聚焦采煤机滚筒振动辅助高性能制造技术开展工况匹配与工程验证工作。依托多年采掘滚筒研发制造经验，系统梳理异型截割滚筒复杂曲面加工难点、强冲击交变载荷下涂层易开裂剥落等行业痛点，明确陶瓷-金属复合涂层强韧性、曲面全域成形均匀性技术指标；配合研发团队完成多波凸轮悬臂梁激振装置

在异型滚筒曲面的适配调试，开展多批次滚筒振动辅助激光熔覆试制，对比常规熔覆与振动辅助工艺下涂层组织、抗冲击疲劳性能差异，验证高频微幅振动对曲面熔覆缺陷抑制、强韧化提升作用，为创新点 2 工艺优化提供大量工程试验依据。公司根据现场产业需求，将振动辅助陶瓷金属复合熔覆滚筒投入多个矿区采掘工作面开展工业考核，持续收集井下长期服役数据，优化滚筒批量熔覆标准化工艺流程；同步开展成套技术行业交流示范，推动振动辅助熔覆强化工艺在各类采掘截割部件上推广落地，为煤机截割装备绿色长寿命制造提供可复制工程方案。

八、完成人合作关系说明

该项目成果由西安重工装备制造集团有限公司、中国矿业大学、清华大学、西安交通大学、西安重装铜川煤矿机械有限公司、西安重装蒲白煤矿机械有限公司、西安煤矿机械有限公司联合研究完成。程延海为成果第 1 完成人，自 2019 年至今，作为总负责人主持项目立项和整体研究工作，主要完成人在项目中的合作经历如下：

1.西安重工装备制造集团有限公司杨强来（2）、苏乐（5），中国矿业大学程延海（1）、周嘉利（3）、王家乐（9），清华大学崔然（4），西安交通大学王豫跃（6），西安重装铜川煤矿机械有限公司宋晓军（8），西安重装蒲白煤矿机械有限公司程永军（7）、杨雄伟（10）共同完成“煤机装备激光再制造形性

调控技术及系统研发”项目研究工作。围绕综采“三机”核心部件长寿命表面强化制造行业共性难题，共同确定“材料开发-工艺优化-装备研制-智能管控”全链条技术路线，攻克了长尺寸油缸熔覆精度难控、滚筒强冲击下强韧性匹配不足、中部槽大面积熔覆质量波动大、批量熔覆管控能力薄弱的行业技术瓶颈，构建了高端煤机装备激光制造成套技术体系。

2.中国矿业大学周嘉利（3）、程延海（1）共同完成发明专利“一种盾构机刀具表面自润滑硬质复合涂层的制备方法”，对创新成果 2 作出了重要贡献。提出了陶瓷-金属复合涂层材料设计方法，揭示了陶瓷增强相提升涂层耐磨抗冲击 性能的作用机理，为采煤机滚筒复合熔覆技术开发提供了重要技术支撑。

3.西安重工装备制造集团有限公司苏乐（5）、西安重装蒲白煤矿机械有限公司程永军（7）、杨雄伟（10）共同完成发明专利“一种煤矿刮板输送机中部槽用高熵合金涂层及制备方法”研究工作，对创新成果 3 作出了重要贡献。研发了耐磨高熵合金专用涂层体系，攻克了中部槽磨损-冲击耦合工况下涂层适配性差的技术难题，显著提升了中部槽熔覆质量稳定性与服役寿命。

4.全体完成人共同完成的“煤机装备激光再制造形性调控技术及系统研发”项目，于 2026 年通过陕西省煤炭学会科技成果鉴定，总体达到国际先进水平，其中振动辅助激光熔覆形性调控技术达到国际领先水平。

5.中国矿业大学程延海（1）、周嘉利（3），清华大学崔然（4），西安交通大学王豫跃（6）等共同发表高水平学术论文 25 篇，其中 SCI 收录 20 篇，详细分析了铁基非晶、高熵合金等熔覆涂层的组织性能调控规律，阐明了振动辅助熔覆的缺陷抑制与强韧化机理，为项目核心技术创新提供了扎实的理论支撑。

6.项目全体完成人共同申请授权发明专利 26 项、登记计算机软件著作权 4 项、制定行业标准 1 项，对项目核心技术成果进行了系统的知识产权保护，明确了成果的具体实施方法与产业化路径。