

科学技术进步奖公示内容

一、 项目名称：构型化抗冲击耐磨复合材料（产品）制造技术及应用

二、 提名者及提名意见（包含提名等级）：

提名者：

陕西省教育厅

提名意见：

该成果在国家自然科学基金、陕西省重点研发计划等项目的支持下，针对矿山、冶金、电力等领域核心机械装备重载化、大型化、高速化快速发展中钢铁基复合材料难以兼顾强度、韧性、耐磨性的瓶颈问题开展研究，提出构型化抗冲击耐磨复合材料（产品）制造技术，选题立足国家重要工程急需，成果创新突出。开发了核壳束状、表面梯度、纤维网状等多种构型化改性结构，探索出理论依据充分且实用性强的制备技术方法，实现了管道、衬板、截齿等产品的复合制造，并进行了产业化推广。成果的应用引领黑色金属制造与产品加工行业技术进步和产业结构优化升级，有广阔的应用前景和推广价值。特推荐为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、 项目简介：

本项目属于材料成型领域。我国是耐磨损钢铁材料生产和应用大国，但存在传统钢铁材料耐磨性较低、韧性不足和消耗量巨大的行业共性关键技术难题。随着矿山、冶金、电力、机械等领域重大装备朝着重载化、大型化、高速化的方向快速发展，这一问题愈发突出。为突破钢铁耐磨材料行业发展瓶颈，引领产业发展，本项目在国家自然科学基金、陕西省重点研发计划等的支持下，针对不同严酷磨损工况用耐磨材料开展攻关，提出构型化抗冲击耐磨复合材料及产品制备技术，实现系列新材料高硬韧性和高耐磨性突破。项目的主要技术内容包括：

（一）发明了核壳束状构型钢铁基复合材料及其两步固相扩散制备技术

解决了碳化物含量增加带来的钢铁基复合材料硬脆难题，显著提高其冲击韧性。核壳束状构型钢铁基复合材料中，碳化物聚集成束状提供给材料足够的硬度和抗磨损性能，而连续的钢铁基体与金属核则显著提高材料损伤容限。碳化物壳层硬度高且呈梯度分布，变化范围 10.4~24.8 GPa，对基体和金属核起到良好的保护作用，宏观硬度 52 HRC 以上，同时，还可保持高的冲击韧性。应用于大型半自磨机、反击式破碎机等多频次强冲击-磨损工况下的耐磨衬板产品的综合使用寿命超过合金钢的 2 倍。同时，开发了与核壳束

状构型钢铁基复合材料相适应的两步原位固相扩散制备技术，经过预压成型与热压成型两个关键步骤，力热耦合条件下使材料致密并获得梯度过渡良好的核壳结构。

（二）发明了表面梯度构型钢铁基复合材料及其近共晶原位制备技术

解决了钢-碳化物/铁复合双金属界面冶金结合难题，突破界面结合强度低的瓶颈问题。表面梯度构型钢铁基复合材料中，碳化铬、碳化钛、碳化钨等强化相由原位反应自生而来，且通过对温度场的调控，使其尺度和含量在厚度纵深方向均呈梯度变化，实现宏观界面冶金结合。复合材料工作表面碳化物含量不低于 70%，复合界面抗拉强度不低于 70 MPa，界面结合力大于 90 N。应用于矿山尾矿运输、电力煤浆输送等液固两相流冲蚀-磨损工况的耐磨管道产品综合使用寿命达到高铬合金钢的 1.5 倍。同时，结合同质元素诱导扩散和原位反应方法，自主开发的与表面梯度构型钢铁基复合材料相适应的近共晶原位制备技术，可同时实现表面梯度构型特征参量和界面结合强度的调控。

（三）发明了纤维网状构型钢铁基复合材料及其多阶段热压烧结制备技术

突破了高含量碳化物增强相钢铁基复合材料硬韧不可兼得的性能瓶颈，同时提高材料的耐磨性与抗断裂能力。纤维网状构型钢铁基复合材料中，金属钛、钨、铌等纤维网按产品结构镶嵌在钢铁基体中，经热压烧结后，金属纤维网转换成碳化物/金属复合纤维网。金属纤维的引入明显提高材料的抗冲击性和损伤容限，同时，原位形成的不同尺度碳化物呈现出多元多尺度的结构特征，可协同材料强韧化。纤维网状构型钢铁基复合材料抗弯强度不低于 1400 MPa，断裂韧性不低于 $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。应用于煤矿平面综采挖掘机、旋挖钻机等多向非均匀冲击-磨损工况下的耐磨截齿产品的综合使用寿命超过硬质合金-钢耐磨截齿的 3 倍。同时，开发了与纤维网状构型钢铁基复合材料相适应的多阶段热压烧结制备技术，经过低温脱蜡、高温闪烧、梯度中温缓烧等核心步骤调控，避免多元体系烧结缺陷的同时保证原位反应充分进行，以获得良好的复合材料组织结构。

四、 客观评价：

1. 科技获奖

2024 年“构型化钢铁基复合材料开发及典型产品研制”获陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖。

2. 科技查新评价

通过与国内外文献报道的对比分析，经陕西省科学技术情报研究院、教育部科技查新工作站查新，表明本成果具有创新性。陕西省科学技术情报研究院出具的“构型化钢铁基复合材料制备技术及典型产品研制”科技查新报告，总结到：“相关文献述及查新

项目所述部分技术，但未见述及综合查新项目所述技术特点的构型化钢铁基复合材料制备技术及典型产品研制。”

3. 项目应用单位和第三方评价

本成果产品的主要推广单位铜川中星材料有限责任公司表示：“耐磨管道产品采用铸造-原位反应技术制备，获得内表面梯度构型的高体积分数碳化物增强钢铁基复合材料与普通碳钢的双金属耐磨管道，适用于液固两相流冲蚀叠加磨损工况，相比于普通双金属管道，综合使用寿命提高 1.5 倍以上；耐磨衬板产品采用局部或整体纤维韧化策略，开发的两步原位固相扩散技术可获得优良的强韧匹配性、优异的耐磨性和结构稳定性，相比于同等工况下使用的高铬合金、高锰钢等产品，其综合使用寿命提高 2 倍以上，性能稳定可靠，获得了用户企业的好评，降低了企业的生产成本和工人的劳动强度，增加了使用单位的经济效益和社会效益。”

4. 结题验收评价

主持完成了国家自然科学基金面上项目 1 项、国家自然科学基金青年基金项目 1 项、陕西省重点研发计划项目 1 项，均顺利通过验收并结题。

五、 应用情况：

构型化抗冲击耐磨钢铁基复合材料（产品）已实现产业化并推广应用，取得了显著的经济效益和社会效益。以耐磨衬板、耐磨管道、耐磨截齿为代表的 3 类构型化抗冲击耐磨产品均具有优良的强韧性和优异的耐磨性，分别装机在多频次强冲击-磨损、液固两相流冲蚀-磨损、多向非均匀冲击-磨损等服役环境下大型半自磨机、矿山物料运输系统、煤矿平面综采挖掘机等重要装备中，运行状态良好，降低了产品更换频次，带来显著的节能降耗效果，降低了企业的生产成本和工人的劳动强度。应用单位和 3 家完成单位共实现经济效益产值 4 亿元。

六、 主要知识产权和标准规范等目录：（限 10 条，所列专利证书颁发日期、标准规范发布日期、论文发表日期应在 2024 年 12 月 31 日之前。填写论文专著时请注意按原文中英文填写）

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	一种抗冲击耐磨耐磨衬板及其制备方	中国	ZL20211084	2022-04-0	第 5065	西安理工大学，铜川中星材料	钟黎声，白海强，吕振林，

		法		71031	8	323号	有限责任公司	武宏, 许梦婷, 赵梓源
2	发明专利	钢-碳化物/铁-钢多层复合耐磨材料及其制备方法	中国	ZL 20181 12774 603	2020-04-21	第 3767 190 号	西安理工大学	钟黎声, 邓超, 燕映霖, 赵娜娜, 惠鹏飞, 白海强, 蔡小龙
3	发明专利	一种钛纤维韧化的钢结硬质合金及其制备方法	中国	ZL 20201 05778 72X	2021-12-17	第 4852 723 号	西安理工大学	钟黎声, 白海强, 吕振林, 曹保卫, 许云华
4	发明专利	一种高锰钢基耐磨板锤的制备方法	中国	ZL 20211 08471 050	2022-04-08	第 5065 130 号	西安理工大学, 铜川中星材料有限责任公司	钟黎声, 庄卫军, 武宏, 白海强, 崔鹏杰, 许云华
5	发明专利	氮化钛增强铁基复合层/钢叠层耐磨材料及其制备方法	中国	ZL 20181 12774 961	2021-06-15	第 4485 726 号	西安理工大学	钟黎声, 邓超, 燕映霖, 赵梓源, 惠鹏飞, 张少雄
6	发明专利	一种碳化物金属基复合棒材及其制备方法	中国	ZL 20211 08472 284	2023-08-22	第 6259 855 号	西安理工大学	钟黎声, 崔鹏杰, 白海强, 庄卫军, 余彧童, 许云华
7	发明专利	一种可用于制作煤截齿的钢结硬质合金头及其制备方法	中国	ZL 20191 07453 931	2021-10-22	第 4744 236 号	西安理工大学	钟黎声, 张少雄, 梁淑华, 白海强, 邹军涛, 朱建雷, 邓超, 许云华,
8	论文	Microstructure and impact properties of Ta-TaC core shell rod reinforced iron-based composite fabricated by in situ solid-phase diffusion	-	2018, 768: 340-348	2018-07-25	Journal of Alloys and Compounds	1. Xi'an University of Technology 2. Shaanxi Key Laboratory of Nano Materials and Technology 3. Yulin University	Haiqiang Bai, Lisheng Zhong, Zhao Shang, Yunhua Xu, Hong Wu, Jiaming Bai, Baowei Cao, Junzhe Wei
9	论文	Microstructure and fracture toughness of a WC-Fe cemented carbide layer produced by a diffusion-controlled	-	2019, 357: 784-793	2018-11-01	Surface & Coatings Technology	1. Xi'an University of Technology 2. YuLin University 3. Xi'an	Xiaolong Cai, Lisheng Zhong, Yunhua Xu, Xin Li, Mingxin Liu

		reaction				gy	University of Architecture and Technology Xi'an University of Technology	
10	论文	Effects of soaking time on the microstructure and mechanical properties of Nb-NbC/Fe core-shell rod-reinforced cast-iron-matrix composite fabricated through two-step in situ solid-phase diffusion	-	2020, 9(6): 12308-12317	2020-09-18	Journal of Materials Research and Technology	Xi'an University of Technology	Zhong Lisheng, Wei Junzhe, Bai Haiqiang, Zhu Jianlei, Xu Yunhua

承诺：上述知识产权无争议且为本项目独有，未曾在往年国家科学技术奖励项目、往年其他省部级（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权利人（专利发明人）的同意，有关知情证明材料均存档备查。

七、 主要完成人情况：

主要完成人：（依次列写完成人姓名）钟黎声、武宏、燕映霖、白海强、蔡小龙、卢正欣

排名	姓名	技术职称	行政职务	工作单位	完成单位	对本项目的贡献
1	钟黎声	教授	无	西安理工大学	西安理工大学	本成果创新点和技术关键的主要提出者和完成者。提出了主要创新点 1、2、3 的设计思路与具体实施方案，带领团队开展应用基础研究、技术方案设计、产品研制与推广应用工作，提出了核壳束状、表面梯度、纤维网状等新构型结构，并将其应用于钢铁基复合材料中，结合两步固相扩散、近共晶原位、多阶段热压烧结等制备技术研发出耐磨衬板、耐磨管道、耐磨截齿等产品。
2	武宏	高级工程师	无	西安建筑科技	西安建筑科技	本成果创新点和技术关键的主要实践者，产品应用推广的核心成员，完成了主要创新点 1、2

		师		大学	大学	的具体实施，参与耐磨管道、耐磨衬板、耐磨截齿等产品两步固相扩散、近共晶原位、多阶段热压烧结等技术开发，在生产技术、装备开发、产品推广方面做出主要贡献。
3	燕映霖	副教授	无	西安理工大学	西安理工大学	本成果创新点和技术关键的主要实践者，产品应用推广的核心成员，完成了主要创新点1的具体实施，参与耐磨管道、耐磨衬板、耐磨截齿等产品两步固相扩散、近共晶原位、多阶段热压烧结等技术开发，在生产技术、装备开发、产品推广方面做出主要贡献。
4	白海强	副教授	无	榆林学院	榆林学院	本成果技术关键的主要实践者，完成了主要创新点1、3核壳结构和纤维网状构型钢铁基复合材料相关研究工作的具体实施，优化了核壳结构增强钢铁基复合材料两步固相扩散制备技术参数，提出了核壳结构双位错塞积的强韧化机理，在基础材料开发与强韧化基础研究方面做出重要贡献。
5	蔡小龙	副教授	无	榆林学院	西安理工大学	本成果技术关键的主要实践者，完成了主要创新点2表面梯度构型钢铁基复合材料（产品）相关研究工作的具体实施，优化了表面梯度构型钢铁基复合材料近共晶原位制备技术参数，在基础材料开发与强韧化基础研究方面做出重要贡献。
6	卢正欣	副教授	无	西安理工大学	西安理工大学	本成果创新点3纤维网状构型钢铁基复合材料（产品）的主要实践者，深度参与了耐磨截齿产品的结构设计、多阶段热压烧结技术开发、性能评价等工作，在耐磨截齿产品研发与产业化推广方面做出重要贡献。

八、 主要完成单位及创新推广贡献：

主要完成单位：（依次列写单位名称）西安理工大学、西安建筑科技大学、榆林学院

排 名	完成单位	创新推广贡献
1	西安理工大学	作为构型化抗冲击耐磨复合材料（产品）制造技术及应用的第1完成单位，提出了主要创新点1、2、3的设计思路与具体实施方案。与西安建筑科技大学、榆林学院合作开展构型化钢铁基复合材料制备原理基础研究及两步固相扩散、近共晶原位、多阶段热压烧结等制备技术开发，完成了构型化抗冲击耐磨产品开发，实现耐磨衬板、耐磨管道、耐磨截齿等产品的推广应用。

2	西安建筑科技大学	作为构型化抗冲击耐磨复合材料（产品）制造技术及应用的第2完成单位，主要围绕创新点1、2核壳束状构型与表面梯度构型钢基复合材料基础材料遴选、两步固相扩散和近共晶原位制备技术优化等方面做出贡献。合作开展构型化钢铁基复合材料制备原理基础研究及两步固相扩散、近共晶原位制备技术开发，积极推广本成果在矿山、电力等行业的应用。
3	榆林学院	作为构型化抗冲击耐磨复合材料（产品）制造技术及应用的第3完成单位，主要在创新点1、3核壳束状构型与纤维网状构型钢基复合材料研发方面做出贡献。合作完成两步固相扩散和多阶段热压烧结技术，并应用于耐磨截齿的制备。

九、完成人合作关系说明：（**合作方式**包括专著合著、论文合著、共同立项、共同知识产权、共同获奖、共同参与制定标准规范、产业合作等。下表中的“项目排名”指在本次报奖中的完成人排序。）

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	合作成果名称
1	共同知识产权	钟黎声/1，武宏/2，白海强/4	2021.07.26	2022.04.08	专利：一种抗冲击耐磨复合衬板及其制备方法
2	共同知识产权	钟黎声/1，燕映霖/3，白海强/4，蔡小龙/5	2019.01.29	2020.04.21	专利：钢-碳化物/铁-钢多层复合耐磨材料及其制备方法
3	共同知识产权	钟黎声/1，白海强/4	2020.11.06	2021.12.17	专利：一种钛纤维韧化的钢结硬质合金及其制备方法
4	共同知识产权	钟黎声/1，武宏/2，白海强/4	2021.07.26	2022.04.08	专利：一种高锰钢基耐磨板锤的制备方法
5	共同知识产权	钟黎声/1，燕映霖/3	2018.10.30	2021.06.15	专利：氮化钛增强铁基复合层/钢叠层耐磨材料及其制备方法

6	共同知识产权	钟黎声/1, 白海强/4	2021.07.26	2023.08.22	专利：一种碳化物金属基复合棒材及其制备方法
7	共同知识产权	钟黎声/1, 白海强/4	2019.08.13	2021.10.22	专利：一种可用于制作煤截齿的钢结硬质合金头及其制备方法
8	论文合著	钟黎声/1, 武宏/2, 白海强/4	2018.05.25	2018.07.25	论文：Microstructure and impact properties of Ta-TaC core-shell rod reinforced iron-based composite fabricated by in situ solid-phase diffusion
9	论文合著	钟黎声/1, 蔡小龙/5	2018.05.28	2018.11.01	论文：Microstructure and fracture toughness of a WC-Fe cemented carbide layer produced by a diffusion-controlled reaction
10	论文合著	钟黎声/1, 白海强/4	2020.05.28	2020.09.18	论文：Effects of soaking time on the microstructure and mechanical properties of Nb-NbC/Fe core-shell rod-reinforced cast-iron-matrix composite fabricated through two-step in situ solid-phase diffusion
11	合作获奖	钟黎声/1, 武宏/2, 燕映霖/3, 白海强/4, 蔡小龙/5	2024.06	2024.06	陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖“构型化钢基复合材料开发及典型产品研制”（2024年）
12	合作获奖	钟黎声/1, 武宏/2	2020.04.06	2020.04.06	陕西省科学技术进步奖一等奖“复杂结构特种双金属构件制备技术及产品研制”（2019年）
13	合作获奖	钟黎声/1, 武宏/2	2019.12.24	2019.12.24	中国有色金属工业科学技术奖一等奖“复杂结构异质金属构件研制及应用”（2019年）

14	合作 获奖	钟黎声/1, 武宏/2, 燕映霖/3	2018.03	2018.03	陕西高等学校科学技术奖一 等奖“双金属复合材料(产品) 制备技术及应用”(2018年)
15	共同 立项	钟黎声/1, 燕映霖 /3, 白海强/4	2020.01	2024.03	多元束状核壳结构增强钢基 层状复合材料的可控制备与 强韧化机理研究, 任务书、验 收证书
16	共同 立项	钟黎声/1, 燕映霖 /3, 蔡小龙/5	2016.01	2019.03	高强韧碳化钛增强高锰钢铁 基复合材料的制备及其形成 机理研究, 任务书、验收证书
17	共同 立项	钟黎声/1, 武宏/2, 燕映霖/3, 卢正欣 /6	2014.04	2020.12	新型微观结构钢铁基复合材 料及产品制备技术, 任务书、 验收证书
18	共同 立项	钟黎声/1, 蔡小龙 /5	2017.08	2024.08	高塑高韧碳化物陶瓷/钢铁表 面复合材料设计与制备, 任务 书、验收证书

注意：专家提名项目还应公示提名专家的姓名、工作单位、职称和学科专业。