

陕西省科学技术进步奖公示信息

(2026年度)

一、项目基本情况

项目名称	山区复杂环境沥青路面车辙演变机理与固废基低碳防控关键技术
主要完成人	郭瑞，薛冰，腾飞，郭云峰，潘映兵，冯旭明
主要完成单位	陕西理工大学，兰州理工大学，汉中市高速公路发展服务中心，汉中公路工程机械化有限公司，中国建筑西北设计研究院有限公司

二、提名意见（适用于单位提名）

提 名 者	汉中市人民政府	提名等级	☐ 一等奖 ☐ 二等奖 ☒ 三等奖
提名意见： 项目针对沥青路面车辙变形技术难题，通过现场调研、模型试验与理论分析，揭示了多源因素作用下永久变形形成机理，建立了基于分形维数的高精度抗车辙性能预测模型（$R^2 > 0.93$）；提出了沥青路面材料设计与性能调控体系，明确了空隙率、矿料间隙率等关键阈值；研发了石墨烯复合废旧橡胶与秸秆纤维改性低碳沥青材料，抗车辙性能提升 30%，实现固废资源化利用。成果已在佛坪县袁家庄至肖家庄道路改建、汉中航空智慧新城基础设施项目等工程中应用，显著提升了路面耐久性与低碳建养水平。项目获授权发明专利 4 项、软件著作权 2 项，发表论文 24 篇（其中：SCI/EI 收录 12 篇）；获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖、陕西省建设工程科学技术进步奖等行业科技奖励 8 项，形成了“基础研究-技术开发-工程应用”良性循环，服务国家“双碳”战略，推广应用前景广阔。 该项目成果材料齐全、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 三 等奖。 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。 软科学标准计量科普类项目请勾选“二等奖”或者“三等奖”。			

三、项目简介

本项目属道路交通与固废资源化利用领域，紧密契合国家“双碳”战略与交通强国建设重大需求。针对沥青路面车辙病害频发、服役寿命短及废旧橡胶、农作物秸秆等固废资源利用低两大行业难题。项目组历时 8 年，依托服务地方、校企联合攻关等项目，立足西北地区典型气候环境特征，系统开展了多源因素作用沥青路面车辙演变机理及高性能抗车辙材料与多源固废高值化利用关键技术攻关。经行业权威机构评价，项目研究成果整体达国内领先水平，为沥青路面病害治理与固废资源化利用提供了关键支撑。

项目面向工程实际需求，秉持低碳与绿色交通发展理念，确立了“机理揭示→材料研发→技术集成”的总体研究思路。项目的总技术路线图及主要内容如下：

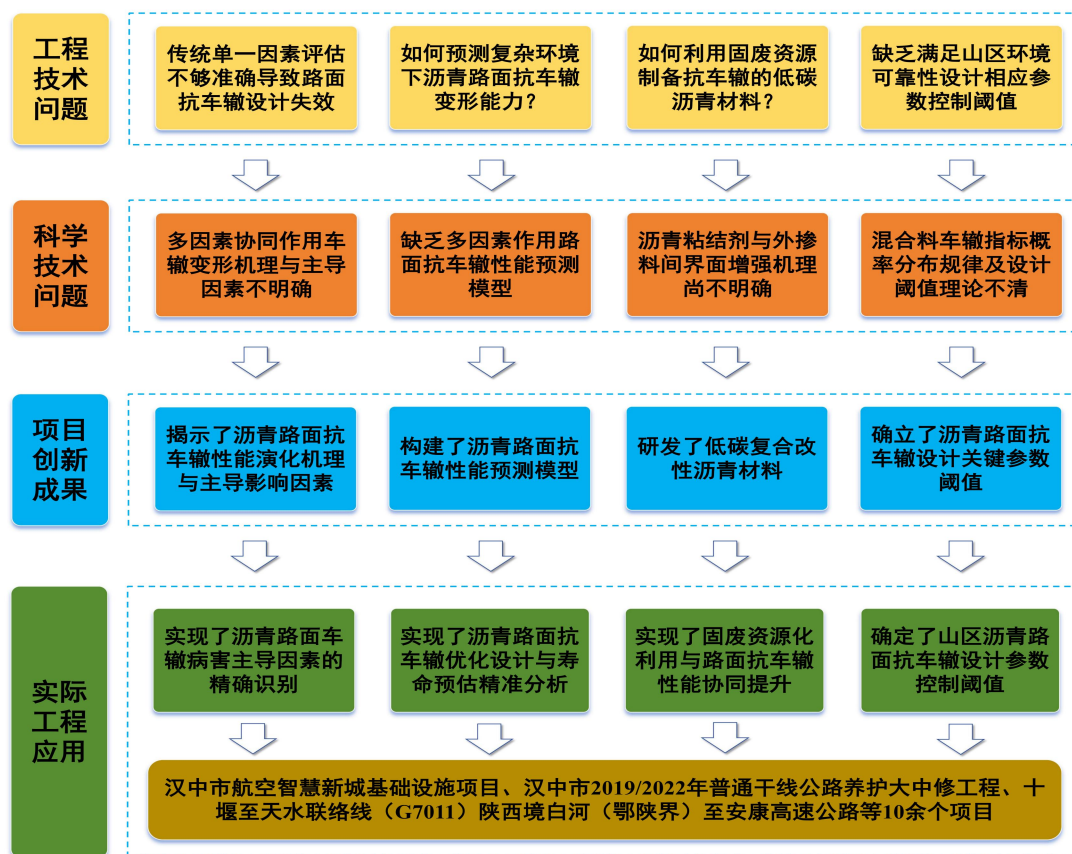


图 1 项目总技术路线图

（1）沥青路面车辙变形机理研究

揭示了多源因素作用下沥青路面车辙演变机理，构建了考虑混合料结构组成特征的抗车辙性能预测模型，解决了传统多因素协同作用下车辙变形演变机理不明及

现有模型在混合料结构特征量化不足条件下预测精度低的技术难题，实现了车辙变形机理的清晰揭示与路面抗车辙性能的高精度预测与主动防控（模型预测精度 $R^2 > 0.93$ ）。

（2）低碳复合改性沥青材料制备技术研究

基于上述沥青路面车辙病害成因解析与国家“双碳”发展理念，研发了氧化石墨烯复合废旧橡胶与秸秆纤维改性低碳沥青材料，解决了废旧橡胶与农业秸秆废弃资源高值化利用低及沥青路面抗车辙性能提升的技术难题，揭示了外掺剂对沥青混合料宏观性能的改性机理并确定了关键参数范围（氧化石墨烯掺量 0.2%~0.5%，秸秆纤维掺量 0.1%~0.3%），实现了固废资源化利用与沥青路面抗车辙变形性能协同提升（抗变形能力较普通沥青混合料提高约 30%）。

（3）沥青路面抗车辙设计关键参数阈值及工程应用

确立了沥青混合料关键参数的表征函数模型，提出了抗车辙设计与施工关键参数控制阈值，解决了因车辙指标随机性与离散性导致评价失准及设计可靠度难以量化的技术难题，揭示了不同结构类型沥青混合料抗车辙性能指标的概率分布规律，确定了多指标最优分布函数，实现了面向西北地区复杂环境特征的抗车辙变形设计与施工质量控制的精准量化参考。

项目共获授权发明专利4项、软件著作权2项；发表学术论文24余篇，其中SCI/EI收录12篇。研究成果获陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖二等奖1项、三等奖1项，陕西省土木建筑科技进步奖二等奖1项，陕西省建设工程科学技术进步奖二等奖1项，陕西理工大学科学技术研究优秀成果奖二等奖3项、三等奖1项。

项目成果已在西北地区10余项重点工程中成功应用，涵盖汉中航空智慧新城基础设施、汉中市普通干线公路第二批大中修及预防性养护工程、十天高速白河至安康段、佛坪袁家庄至肖家庄道路改建、南泥湾至三十里铺红色旅游公路等。主要技术经济指标显著：路面抗车辙性能提升约35%，设计寿命延长约30%；秸秆纤维改性技术降低改性成本50%。固废资源化利用预计每年可消纳废旧轮胎50万条、秸秆10万吨，减少碳排放100万吨。实现了经济效益与低碳效益的双突破，经济和社会效益显著。

四、客观评价

1. 鉴定与验收意见

陕西省岩土力学与工程学会组织的科技成果鉴定委员会（鉴定编号：陕岩评字[2025]第 003 号）一致认为：该项目针对沥青路面车辙病害频发与多源固废消纳的双重挑战，系统开展了多源因素协同作用下车辙演化机理研究，构建了高精度抗车辙性能预测模型，明确了抗车辙设计关键参数阈值，并成功研发了低碳改性沥青材料。鉴定委员会认定，项目成果整体达到**国内领先水平**。

2. 国内外科技查新结论

经陕西省科学技术情报研究院（国家一级科技查新咨询单位/证字 026 号）对国内外文献进行科技查新（报告编号：CX20250500782），结论表明：除该项目组成员发表的文献外，未见涵盖“综合考虑沥青混合料结构特征的多源因素非线性抗车辙性能预测模型”与“基于固废资源化利用的长效抗车辙沥青材料制备技术”相结合的公开报道。项目提出的**基于分形维数核心表征的沥青混合料抗车辙性能预测模型与秸秆纤维低碳改性沥青材料**具有新颖性。

3. 核心知识产权

项目研究成果在国内外核心期刊共发表学术论文 24 篇（其中 SCI/EI 收录 12 篇），总他引次数达 250 次。获授权国家发明专利 4 项、实用新型专利 1 项、软件著作权 2 项，相关知识产权形成了完整的知识产权保护体系。

4. 重要科技奖励

项目研究成果先后荣获：2022 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果二等奖（附件 2-5-1）；2024 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果三等奖；2024 年陕西省土木建筑科技进步奖二等奖；2025 年陕西省建设工程科学技术进步二等奖；2021/2023/2025 年陕西理工大学科学技术研究优秀成果二等奖；2020 年陕西理工大学科学技术研究优秀成果三等奖等。

5. 成果综合评价

综上所述，该项目在多源因素协同作用机理、预测理论、材料研发及低碳应用方面取得了系统性创新突破。其成果不仅为沥青路面抗车辙设计提供了更为精准的

量化依据，也为交通领域“双碳”目标实现提供了可靠的技术支撑。项目技术成熟度高，推广应用前景广阔，经济社会及环境效益显著。

五、应用情况

1. 应用情况（限 2 页）

本项目面向沥青路面车辙病害长效治理与国家“双碳”战略需求，聚焦车辙病害演变机理不清、关键控制参数阈值不明及低碳耐久材料缺乏等技术难题，系统开展了车辙病害多因素演变机理揭示、沥青混合料关键参数阈值范围精细化确定、低碳改性沥青材料研发等理论与工程应用。项目成果已成功应用于汉中航空智慧新城基础设施、国家高速公路十堰至天水联络线（G7011）陕西境白河至安康高速公路、佛坪县袁家庄至肖家庄道路改扩建工程、汉中市 2022 年普通干线公路第二批大中修及预防性养护工程、泾河新城崇文塔东路工程等 10 余个工程项目，覆盖高速公路、县域公路及市政道路等多个领域。推广应用结果表明，项目有效提升了沥青路面的抗车辙性能与服役寿命，降低了全寿命周期养护成本与碳排放，经济社会效益显著，为沥青路面设计、施工及养护提供了重要的理论依据和技术支撑。

主要应用单位情况表

序号	单位名称	应用技术	应用对象	应用起止时间
1	中国建筑西南勘察设计院有限公司	含有改性纳米氧化石墨烯的沥青及沥青混合料	汉中航空智慧新城部分基础设施项目 A 标段（时代大道西延伸段）	2019.01-2019.09
2	陕西省高速公路建设集团公司	沥青路面高温服役稳定性影响因素及机理	国家高速公路十堰至天水联络线（G7011）陕西境白河（鄂陕界）至安康高速公路	2009.01-2021.01
3	汉中市交通运输局	沥青路面车辙影响因素及体积指标分布规律	佛坪县袁家庄至肖家庄道路改建工程	2020.02-2021.12
4	汉中公路工程机械化有限公司	山区沥青路面抗车辙关键设计参数的合理取值范围	汉中市 2022 年普通干线公路第二批大中修及预防性养护工程	2023.03-2023.09
5	汉中公路工程机械化有限公司	石墨烯复合废旧橡胶改性沥青制备	汉中市 2022 年普通干线公路第二批大中修及预防性养护工程	2023.03-2023.09
6	汉中公路工程机械化有限公司	山区沥青路面抗车辙关键设计参数的合理取值范围	汉中市 2019 年普通干线公路养护大中修工程	2019.07-2019.10
7	汉中公路工程机械化有限公司	石墨烯复合废旧橡胶改性沥青制备	汉中市 2019 年普通干线公路养护大中修工程	2019.07-2019.10

8	中交一公局集团有限公司泾河新城崇文塔东路工程项目经理部	小麦秸秆沥青混合料配合比设计方法	中交一公局集团有限公司泾河新城崇文塔东路工程项目	2022.08-2023.10
9	中国建筑西北设计研究院有限公司	沥青路面车辙病害影响因素及体积指标分布规律	德令哈客运交通枢纽项目	2020.10-2021.12
10	中国建筑西北设计研究院有限公司	沥青路面车辙病害影响因素及体积指标分布规律	国际港务区中轴生态公园一期项目 EPC	2020.09-2021.12

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	论文	Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement	中国	Construction and Building Materials 254 (2020) 119237, 2020	2020 年 09 月 10 日	Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119237	陕西理工大学	郭瑞, 念腾飞, 周飞
2	发明专利	含有改性纳米氧化石墨烯的沥青及沥青混合料	中国	ZL 2021 1 1211324.6	2023 年 02 月 28 日	5759947	陕西理工大学	郭瑞
3	论文	Study on influencing factors and distribution probability of asphalt mixtures' rutting samples physical indices	中国	Structure 56(2023) 104830, 2023	2023 年 07 月 21 日	Doi: 10.1016/j.jstruc.2023.07.020	陕西理工大学	郭瑞, 腾飞, 念周, 周飞, 等
4	论文	Evaluation of the road performance and engineering application of asphalt mixtures incorporating straw fiber	中国	Journal of Materials in Civil Engineering 37(6), 2025	2025 年 03 月 24 日	Doi: 10.1061/JMCEE7.MTENG-19635	陕西理工大学	郭瑞, 念腾飞, 薛冰, 等
5	论文	Analysis of primary influencing factors and indices distribution law of rutting performance of asphalt mixtures	中国	Case Studies in Construction Materials 16 (2022) e01053, 2022	2022 年 04 月 16 日	Doi: org/10.1016/j.cscm.2022.e01053	陕西理工大学	郭瑞, 周飞, 念腾飞
6	论文	Indices relation and statistical probability analysis of physical and mechanical performance of asphalt mixtures	中国	Case Studies in Construction Materials 16 (2022) e01091, 2022	2022 年 04 月 16 日	Doi: org/10.1016/j.cscm.2022.e01091	陕西理工大学	郭瑞, 周飞, 念腾飞
7	发明专利	含有纳米材料的改性沥青及其应用	中国	ZL 2021 1 1211300.0	2023 年 01 月 31 日	5719107	陕西理工大学	郭瑞

8	论文	Analysis on the road performance of graphene composite rubber asphalt and its mixture	中国	Case Studies in Construction Materials 17 (2022) e01664, 2022	2022年11月25日	Doi: org/10.1016/j.cscm.2022.e01664	陕西理工大学	郭瑞, 唐建华, 冯旭明, 等
9	论文	秸秆纤维在建筑材料中的应用研究展望	中国	路基工程	2024年10月29日	Doi: 10.13379/j.issn.1003-8925.202312069	陕西理工大学	孙锦堂, 郭瑞, 郭云峰, 等
10	论文	Improved three-dimensional discrete modeling method and anti-cracking properties of asphalt mixture	中国	Construction and Building Materials 321 (2022), 126405	2022年8月8日	Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126405	兰州理工大学	念腾飞, 戈锦果, 郭瑞, 等

七、主要完成人情况表

姓 名	郭瑞	排 名	1
行政职务	-		
技术职称	副教授		
工作单位	陕西理工大学		
完成单位	陕西理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 全面主导核心技术攻关，取得以下成果：1）揭示秦巴山区复杂环境沥青路面车辙演化机理，构建多因素预测模型，提升了路面车辙病害预测精度（ 创新点一，附件 1-1-1/1-1-3 ）； 2）面向“双碳”战略需求，研发氧化石墨烯复合废旧橡胶和秸秆纤维改性剂使沥青混合料性能整体提升，同时实现碳排放降低（ 创新点二，附件 1-1-2/2-4-1/2-4-4/2-4-7 ）。3）提出了面向山区复杂环境的沥青路面抗车辙性能设计参数控制阈值，为区域路面变形设计与施工控制提供了量化标准（ 创新点三，附件 2-4-2/2-4-3 ）。			

姓 名	薛冰	排 名	2
行政职务	中心主任		
技术职称	高级工程师		
工作单位	汉中市高速公路发展服务中心		
完成单位	汉中市高速公路发展服务中心		
对本项目技术创造性贡献： 作为项目合作完成人之一，主要负责组织与协调项目成果在秦巴地区公路工程中的推广应用，积极推动石墨烯废旧橡胶改性沥青和秸秆纤维改性沥青混合料在道路工程中的高值化利用，助力实现区域交通设施碳减排目标。同时，共同完成了秸秆纤维沥青混合料路用性能研究（附件2-4-1），相关成果进一步充实并完善了创新点二的体系。			

姓 名	念腾飞	排 名	3
行政职务	-		
技术职称	副教授		
工作单位	兰州理工大学		
完成单位	兰州理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 作为项目合作完成人之一，本人与第一完成人共同攻关完成：1）多源因素作用下沥青路面层间粘结材料的抗车辙剪切变形机理及其演化规律（ 创新点一，附件 1-1-1/1-1-3 ），完善了该创新点提供了理论支撑；2）参与研究了秸秆纤维改性沥青混合料路用性能，实现碳排放降低（ 附件 2-4-1 ），完善了 创新点二 体系；3）开发了基于 Matlab 的概率分布拟合算法，实现了宏微观指标分布规律分析（ 附件 2-4-2/2-4-3 ），有效完善了 创新点二 的技术体系。			

姓 名	郭云峰	排 名	4
行政职务	总经理		
技术职称	高级工程师		
工作单位	汉中公路工程机械化有限公司		
完成单位	汉中公路工程机械化有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 作为项目主要完成人之一，主要负责项目成果的推广和应用，组织所研发改性沥青路面材料试验段铺筑及性能跟踪观测，修正并完善了施工关键参数，为项目成果在区域公路工程中的成功应用提供了工程实践支撑。参与完成了秸秆纤维沥青混合料路用性能研究（附件 2-4-7），相关成果充实并完善了创新点二的体系，并推动了关键科技成果向实际应用的转化（附件 1-2-4/1-2-5/1-2-6/1-2-7）。			

姓 名	潘映兵	排 名	5
行政职务	二级单位总工程师		
技术职称	高级工程师		
工作单位	中国建筑西北设计研究院有限公司		
完成单位	中国建筑西北设计研究院有限公司		
对本项目技术创造性贡献： 作为本项目主要完成人之一，主要负责项目成果的推广应用与技术指导，协助第一完成人制定项目总体实施方案等。在项目执行过程中，系统引入实际工程先进技术，应用于实验设计与理论建模环节，有效促进了理论与工程实践深度融合，推动了关键科技成果向实际应用的转化（附件 1-2-9/1-2-10）。对项目的 创新点一和三 作出了重要贡献，为实现显著经济效益与社会效益提供了坚实支撑。			

姓 名	冯旭明	排 名	6
行政职务	-		
技术职称	高级工程师		
工作单位	陕西理工大学		
完成单位	陕西理工大学		
对本项目技术创造性贡献： 作为项目合作完成人之一，深度参与项目成果科研攻关，具体贡献：系统整合并深入分析了研究区内的气候环境资料，为氧化石墨烯复合改性材料的区域适应性设计提供了基础支撑；在次基础上，主导开展了氧化石墨烯改性沥青的实验室制备与性能测试，提出了基于废旧橡胶粉碎粒与纳米材料分散工艺调控的复合改性技术，成功制备出废旧橡胶与氧化石墨烯复合改性列出，显著提升改性沥青的高低温性能。相关成果（附件 2-4-5）支撑创新点三。			

八、主要完成单位情况表

单位名称	陕西理工大学
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 陕西理工大学作为项目第一完成单位，为项目重要研究发现和科技创新的顺利开展和成果产出提供了全方位支撑保障。 在科研条件方面，学校配置有沥青材料性能测试系统（含软化点仪、针入度仪、延度仪等）、混合料成型与性能评价设备（马歇尔击实仪、碾压成型机、浸水车辙仪等）、结构性能测试平台（MTS 万能试验机、UTM-100 伺服试验机等）等仪器设备。 在人才支撑方面，组建了由科研、试验教师和研究生构成的研究团队，团队专业覆盖道路材料、结构工程、数值模拟等研究方向。在文献保障方面，依托学校图书馆 CNKI、EI 等中外文数据库资源，以及土木工程专业馆藏图书 1.2 万册、核心期刊 56 种，能够为本项目实施提供文献检索服务。 学校积极推动成果转化应用，依托“岩土工程与地下工程创新实验”平台，与中铁一院等企事业单位建立产学研合作，联合开展技术推广示范。通过组织技术对接会、成果推介会等形式，促进研究成果在工程中应用。上述科研条件、人才队伍、文献保障等体系的系统建设，对本项目的完成提供了强有力的保障。	

单位名称	汉中市高速公路发展服务中心
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 作为项目成果在汉中地区推广应用的主要组织协调单位，充分发挥行业管理与统筹协调职能，积极推动石墨烯-废旧橡胶、秸秆纤维改性沥青路面材料在佛坪县袁家庄至肖家庄道路改建工程、汉中航空智慧新城基础设施项目等干线公路及扶贫公路工程中的示范应用。在项目实施过程中，组织制定区域应用推广方案，协调解决施工过程中关键技术问题，确保材料体系与区域环境条件下的施工工艺相适应。通过组织技术培训、现场观摩、工程回访等方式，有力促进了成果在区域内交通扶贫与物流通道建设中的落地转化，显著提升了路面耐久性能与低碳效益，为区域公路绿色低碳建设提供了可复制、可推广的实践经验。	

单位名称	兰州理工大学
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 兰州理工大学作为本项目第二完成单位，在项目重要科学发现和科技创新全周期中发挥了不可替代的支撑作用，形成了高效协同的创新共同体。具体贡献体现在以下四个方面：1）技术创新支撑体系构建：构建由教授和副教授组成的专家技术咨询团队，深度参与项目实施方案论证与关键技术攻关。此外，其提供的 MTS-810 材料试验系统、DHR 流变仪等高端设备，填补了申报单位在材料动态特性测试领域的技术空白；2）科研资源协同共享：依托国家级“西部土木工程防灾减灾”教育部工程研究中心，构建了跨单位的试验资源共享平台。3）成果转化和凝练阶段：组织校内道路工程、材料科学等领域专家开展技术论证，优化形成可工程化的技术参数体系。4）协同创新机制建设：建立“月例会+年简报”的协同机制，联合培养研究生。合作发表 SCI 论文 6 篇。 该校的深度参与充分体现了“优势互补、责任共担、成果共享”的合作原则，其贡献贯穿项目立项论证、技术攻关、成果转化全过程，为项目的技术创新性和工程适用性提供了坚实保障。	

单位名称	汉中公路工程机械化有限公司
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 作为本项目成果的核心应用单位，本单位主要负责项目成果在秦巴地区公路工程中的现场实施与验证，重点针对所研发的改性沥青路面材料，系统开展了施工工艺优化与面层结构稳定性控制研究。通过足尺试验段铺筑与长期性能追踪，明确了适应秦巴山区公路沥青路面材料的拌合、碾压等关键工艺参数，并提出了压实度均匀性、层间粘结强度等稳定性控制指标，有效提升了现场施工质量与路面长期稳定性。同时，基于项目提出的面向山区环境的设计与施工关键参数建议值，完成了从理论值到工程化参数边界的转化与修正，为项目成果在类似地区的应用提供了可靠的现场技术依据。	

单位名称	中国建筑西北设计研究院有限公司
对本项目科技创新和应用推广情况的贡献： 中国建筑西北设计研究院有限公司作为第四完成单位，为项目科技创新和应用推广的顺利实施提供了关键支撑。在科技创新方面，单位积极协调并提供野外勘查、现场试验所需的技术团队、专用车辆及先进检测仪器设备，为获取可靠实验数据、验证理论计算方法奠定了坚实基础。在应用推广方面，单位依托自身工程实践平台与行业影响力，积极推动项目创新成果的工程化转换与规模化应用，项目技术成果已在德令哈综合客运交通枢纽项目、国际港务中轴生态公园一期项目 EPC 等多个实际项目中实现了技术推广应用，对成果的提炼、标准化和市场应用提供了重要指导与资源支持，显著提升了成果的实用性和行业影响力。	

完成人合作关系说明

本申报项目“沥山区沥青路面车辙病害机理与固废基低碳防控关键技术及应用”由汉中市高速公路发展服务中心、汉中市交通运输局、汉中公路工程机械化有限公司、中国建筑西北设计研究院有限公司等单位共同完成。项目针对西部复杂环境下沥青路面耐久性不足与低碳建设需求之间的矛盾，围绕复合材料多相体系协同增强机制开展了系统的产学研用联合攻关。各完成单位及完成人分工明确、优势互补，通过技术研发、工艺开发、标准制定与工程应用等环节的紧密协作，共同取得了本项目的创新性成果。

本项目第一完成人郭瑞与其他五位完成人（薛冰、念腾飞、郭云峰、潘映兵、冯旭明）在沥青路面病害机理、低碳防治技术及功能材料研发领域建立了长期稳定的合作关系。具体合作情况如下：

一、与第二完成人薛冰的合作关系

双方自 2018 年起，依托汉中市高速公路服役环境与养护需求，围绕秸秆纤维沥青低碳材料研发及其工程推广应用开展深度合作。重点针对秸秆纤维对沥青混合料路用性能的改性机理、配合比设计与现场施工工艺进行联合攻关，共同推进了低碳沥青材料在实际工程中的规模化应用，有力支撑了创新点 3“氧化石墨烯复合废旧橡胶与秸秆纤维改性低碳沥青材料”的研发与固废资源化利用。代表性合作成果为：共同发表学术论文《Evaluation of the road performance and engineering application of asphalt mixtures incorporating straw fiber》（附件 2-4-1）；依托汉中市高速公路养护工程开展多项成果推广应用（附件 1-2-3），实现了科研成果向工程实践的有效转化。

二、与第三完成人念腾飞的合作关系

双方为同门师兄弟，自 2018 年起在沥青路面抗车辙性能机理分析与评价方法领域持续合作，共同完成了多项高水平研究成果。合作重点包括：系统揭示多因素协同作用下沥青路面车辙非线性演变机理，构建基于分形维数核心表征的抗车辙性能预测模型，直接形成了创新点 1“揭示了沥青路面车辙演变机理与抗车辙预测模型”；共同确立沥青混合料关键物理指标的不确定性表征函数与抗车辙设计参数控制阈值，揭示了不同结构类型混合料抗车辙性能的概率分布规律，奠定了创新点 2“提出了沥青混合料关键参数不确定性表征函数与抗车辙阈值范围”的理论基础。代表性合作成果包括：《Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt

pavement》(附件 1-1-1)、《Analysis of primary influencing factors and indices distribution law of rutting performance of asphalt mixtures》(附件 2-4-2)等,为车辙变形的高精度预测与主动防控提供了核心理论支撑。

三、与第四完成人郭云峰的合作关系

双方自 2019 年起,在沥青路面室内试验、低碳养护技术开发与工程推广应用层面紧密协作。充分发挥汉中公路工程机械化有限公司在施工装备与工程化方面的优势,共同开展改性沥青混合料的生产工艺优化、施工质量控制及试验路铺筑与长期性能跟踪观测。合作成果直接服务创新点 3 低碳沥青材料的工程化验证与创新点 2 设计指标在施工质量控制中的精准应用。代表性合作成果为:共同发表学术论文《秸秆纤维在建筑材料中的应用研究展望》(附件 2-4-6);共同荣获陕西省土木建筑科技进步奖二等奖(项目名称:“秦巴山区公路沥青路面稳定性影响因素及其防控措施关键技术”,附件 2-5-3);并联合实施了多项工程应用示范(附件 1-2-4、1-2-5、1-2-6、1-2-7),有效保障了项目技术成果的落地与推广。

四、与第五完成人潘映兵的合作关系

自 2020 年起,陕西理工大学与中国建筑西北设计研究院有限公司依托产学研深度融合模式,围绕本项目开展了系统性联合攻关与成果转化应用合作。双方发挥各自优势,形成“基础研究-技术开发-工程应用”全链条协同攻关机制:陕西理工大学主要负责车辙形成机理的核心理论创新与实验测试工作,中建西北院重点承担项目整体设计、施工推进及成果落地应用。合作形成的项目成果已在德令哈客运交通枢纽、国际港务区中轴生态公园一期项目 EPC 等多个工程中成功应用(详见附件 1-2-9、1-2-10),显著提升了路面抗车辙性能,取得了良好的经济效益与社会效益。双方合作关系真实、稳定,共同推动了本项目的技术进步与产业化落地。共同荣获陕西省土木建筑科技进步奖二等奖(项目名称:“秦巴山区公路沥青路面稳定性影响因素及其防控措施关键技术”,附件 2-5-3)。

五、与第六完成人冯旭明的合作关系

双方作为课题组成员,自 2020 年起,积极响应国家“碳达峰、碳中和”战略,共同确立“氧化石墨烯改性废旧橡胶复合沥青”为突破口,开展系统性产学研联合攻关。合作期间,双方发挥各自优势,协同整合区域内典型气候分区的路面服役环境数据与区域地质特征,联合建立了材-环境适配性数据库;共同优化废旧橡胶粉碎粒径与纳米材料分散工艺,成功制备出废旧橡胶与氧化石墨烯复合改性材料及混合

料，并合作完成了系统的性能测试与评价，取得了一系列具有自主知识产权的技术成果，有力支撑了废旧橡胶高值化利用与道路绿色低碳建设。代表性合作成果为：《Analysis on the road performance of graphene composite rubber asphalt and its mixture》（附件 2-4-5）。

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	郭瑞/1、薛冰/2	2018 年 01 月	2025 年 12 月	Evaluation of the road performance and engineering application of asphalt mixtures incorporating straw fiber	附件 2-4-1
2	论文合著	郭瑞/1、念腾飞/3	2016 年 08 月	2025 年 12 月	Analysis of factors that influence anti-rutting performance of asphalt pavement	附件 1-1-1
3	论文合著	郭瑞/1、郭云峰/4	2019 年 01 月	2025 年 12 月	秸秆纤维在建筑材料中的应用研究展望	附件 2-4-6
4	共同获奖	郭瑞/1、郭云峰/4、潘映兵/5	2020 年 01 月	2025 年 12 月	秦巴山区公路沥青路面稳定性影响因素及其防控措施关键技术	附件 2-5-3
5	论文合著	郭瑞/1、冯旭明/6	2020 年 01 月	2025 年 12 月	Analysis on the road performance of graphene composite rubber asphalt and its mixture	附件 2-4-5