

项目合同编号：25-43K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：闫亚鹏

通讯邮编、地址：710075、陕西省西安市雁塔区科技四路 205 号

传真、电话：029-88853000

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-43K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

项目负责人：闫亚鹏

通讯邮编、地址：710075、陕西省西安市雁塔区科技四路 205 号

传真、电话：029-88853000

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制



一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

(1) 沥青混凝土路面服役特征及梯度自愈合行为分析

采集沥青路面服役过程中气候条件、交通荷载、病害状态等数据，分析提出各类数据量化表征指标，研究多因素作用下沥青混凝土路面服役特征变化规律；分析沥青混凝土梯度自愈合过程，建立梯度自愈合表征体系，表层侧重愈合速度，中面层侧重粘结强度、结构强度；采用室内多层试件分层检测、现场钻孔取芯、路面雷达扫描的方式，验证不同深度路面的梯度愈合效果。构建面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合行为表征与效果评价方法。

(2) 沥青混凝土材料梯度自愈合性能需求及其调控方案研究

结合室内试验与数值模拟等手段，探究沥青混凝土梯度自愈合微纳观机理，解析沥青混凝土材料梯度自愈合行为影响因素与优化需求，采用组分梯度设计思路，匹配各层愈合需求；通过室内分层试件微波加热试验、依托工程现场分段验证，评价梯度愈合效果。提出沥青混凝土材料梯度自愈合性能调控方案，分析评估不同调控方案下沥青混凝土材料自愈合效果。

(3) 面向双碳目标的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料研发

以双碳目标为导向，优选不同极性和介电损耗角的添加剂材料，分析该材料与沥青混合料的相容性，明确各组分掺配需兼顾微波升温性能与混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性，确保路用性

能符合规范要求，确定其最佳配比与添加制备工艺，研发满足自愈合性能需求的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料。

(4) 微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料质量控制及应用研究

根据微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料自身特点，明确微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量影响关键因素，提出针对性施工质量控制技术，并在实体工程中进行应用验证，完善双碳相关评价指标和检验标准。

2. 技术关键

(1) 多尺度、多物理场耦合下的自愈合行为及梯度效应

沥青混凝土的自愈合是一个涉及热、流、力、化学等多物理场耦合的复杂过程，在宏-观-微-纳多个尺度上同时发生。目前对其内在的动力学机制，特别是微波能量如何转化为材料内能、如何驱动沥青分子链的扩散与重排、如何实现裂缝界面的有效粘结等关键环节，尚缺乏系统深入的认知。这导致材料设计和工艺优化缺乏坚实的理论指导。理想的修复是裂缝从底部到表面均匀、彻底地愈合。然而，微波能量在材料中的传播与衰减具有其固有规律，如何通过材料组分的梯度化设计，主动调控电磁-热转化效率在空间上的分布，使之与裂缝在不同深度的愈合需求相匹配，形成协同、高效的梯度愈合效应，是本项目需要解决的核心技术问题。

(2) 多功能耦合材料的协同设计与性能平衡

高含量的微波敏感添加剂（如某些金属粉末）虽能提升加热效

率，但可能对沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等基本路用性能产生负面影响，且可能涉及高能耗、高成本的原材料。如何通过分子设计、多组分复配、界面改性等手段，在保证材料具备快速、均匀微波升温能力的同时，使其各项路用性能满足或优于规范要求，并尽可能采用工业废料或低碳原料，是实现材料成功应用的巨大挑战。

路面材料需服役数年甚至数十年，微波敏感组分在长期老化（紫外、氧、水）作用下，其性能是否会衰变？经过多次微波辐射激活后，材料的自愈合能力是否会衰减？沥青基体本身是否会因多次加热而加速老化？这些问题直接关系到技术的长期有效性和经济性，必须在材料设计阶段予以充分考虑和验证。

（3）沥青混凝土自愈合技术落地的工艺适配性与质量可控性

实验室小样制备与工程大规模生产在工艺参数、均匀性控制上存在显著差异。如何将研发的材料配方转化为稳定、可控的工业化生产工艺，确保每一批次的微波敏感型沥青混合料都具有一致且可靠的性能，是技术推广的前提。

微波自愈合技术需要配套的现场施工工艺，包括微波发射设备的参数设置（功率、时间、移动速度）、照射方式、以及修复后的快速质量评价方法。目前，这些工艺参数和质量检验标准均为空白，需要本项目进行研究、确立并验证，形成一套完整的技术规程。

3. 依托工程（依托工作）

青银高速靖边至王圈梁段是国道主干线（G035）青岛～银川陕

西境内的重要一段，是连接银川、太原、青岛等大中城市的重要路线，是陕西省“十五”公路建设重点工程之一。也是其公路骨架的重要组成部分，是连接陕北能源化工基地与关中经济带的重要通道，道路建成通车以来，充分显示出了其在交通运输行业中的重要地位与作用，为区域经济的快速发展提供了强有力的基础保障，成为区域社会经济发展的“黄金通道”。极大促进沿线区域资源开发和引资开放，对于推进西部大开发战略的实施起着十分重要的作用。

青银高速靖王段起自靖边县新农村乡上彭湾，经靖边、东坑、梁镇、安边、定边，止于陕宁交界王圈梁，与已建成的宁夏古王高速公路相接，起讫桩号 K1241+245~K1373+533，路线全长 132.288 公里。计算行车速度 100 公里/小时，路基宽度 26 米，双向四车道，全立交，全封闭控制出入，全线于 2003 年 3 月开工，2005 年 10 月建成通车。

本项目依托青银高速靖边至王圈梁段作为试点工程，该路段作为区域社会经济发展“黄金通道”的地位显著，交通荷载繁重，具有典型的长期服役与养护需求。在此具有代表性与战略重要性的工程平台上，开展微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量影响关键因素及针对性施工质量控制技术的应用工作。通过现场调查、数据采集与验证分析，为沥青混凝土梯度自愈合材料及其智能化养护技术示范提供示范案例，提升研究成果的工程适用性与可靠性。

二、考核指标

1.预期目标

(1)构建沥青混凝土路面自愈合行为多尺度表征方法及评价体系；

(2)研发基于低碳环保的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料 1 种；

(3)提出微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量控制技术 1 项；

(4)申报国家专利不少于 2 项、发表高水平论文不少于 2 篇(其中 SCI 或 EI 不少于 1 篇)。

2.主要技术经济指标

(1) 技术指标

1)微波照射 10min 内，微波敏感型自愈合沥青混凝土材料温度到达自愈合温度区间；

2)微波敏感型自愈合材料高温、低温、水稳定等基本路用性能符合规范要求，自愈合后以上性能恢复至原有性能 80%以上；

3)在微波照射区域下，微波敏感型自愈合沥青混凝土材料温度上升幅度均匀一致，短时间内不会造成沥青老化，无大量烟尘气体排放。

(2) 经济指标

1) 养护维修效率

微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合技术具有施工效率高、能源

损耗小、施工成本低、不损伤原路面可多次激活实现路面多次自愈合的特点，相比传统养护修复方法维修效率提高 50%以上。

2) 全寿命周期费用

针对传统修复方法（沥青混合料采用 SBS 改性沥青 SMA-13）和微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合修复，采用全寿命周期费用分析方法分析全寿命周期费用，相比于常规沥青混凝土每平方可节省费用 40%以上。

3) 双碳评价指标

每再生利用 1 吨 RAP 料可减少 0.25 吨的二氧化碳排放，采用微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合技术可在现有基础上 RAP 料利用率提高 50%。

3.经济和社会效益

裂缝是沥青路面局部破损中最常出现的病害类型，若裂缝病害维修养护不及时将引起对行驶安全严重影响的坑槽等病害，且在车辆冲击荷载的作用下，坑槽破损会加快而连成一片，致使局部路段大面积损坏，严重影响路面的使用寿命和车辆行驶的安全性。根据数据统计分析，因裂缝引发的坑槽病害 80%以上为表面层坑槽，但若维修养护不及时，会迅速发展成为中上面层坑槽，无形中降低了路面行驶质量及安全性能，也造成了维修工作的增加。在路面养护工作中，路面裂缝及引发的坑槽病害处治不仅影响交通保畅，而且费工费时，特别是该类病害的现有养护技术的处治质量难以得到有效保证。

以沥青路面典型、易发且维修养护困难的裂缝及坑槽病害为例，开展沥青路面自愈合材料寿命周期费用分析，用以论证沥青路面自修复材料的优越性。根据中交第一公路勘察设计研究院有限公司承担的交通运输部企业技术创新项目《沥青路面无损温再生技术研究》（合同编号 2014315490010）的调研分析结论，路面裂缝及其引发的坑槽病害通常会在通车后 5 年左右发生，常规裂缝及坑槽修补材料的使用寿命为 1~2 年左右，即采用常规沥青混合料修补裂缝及坑槽后，通常会在两年左右复发病害，因而在设计寿命周期 15 年内同一位置若不受其他养护行为的干扰，同一位置裂缝或坑槽病害采用常规修补材料，按照使用寿命 2 年考虑，则寿命周期内需维修五次。而采用微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料修补裂缝或坑槽病害，可实现病害部位与周边旧沥青路面的良好融合，使用寿命通常在 3~5 年以上，早期病害通常会在五年左右复发病害，因而在设计寿命周期 15 年内同一位置若不受其他养护行为的干扰，同一位置路面早期病害按照使用寿命 4 年考虑，则寿命周期内需维修三次。大幅降低了病害养护的频率和成本，不仅减少了后期养护施工成本的投入，还减少了道路封道施工的频率，较常规养护手段减少对交通的影响。

因此，该项目技术应用具有良好的经济效益和社会效益。

4.成果提供形式

（1）报告：完成《面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用》课题研究报告 1 份；

(2) 专利：申报国家专利 ≥ 2 项；

(3) 论文：发表核心期刊论文 ≥ 2 篇，其中 SCI 或 EI 检索不少于 1 篇。

5. 其他考核指标

(1) 开展的媒体宣传报道不少于 3 次；

(2) 技术交流不少于 1 次；

(3) 培养专业技术人才不少于 2 名。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标
2026.03.01 — 2026.06.01	采集沥青路面气候环境、交通荷载及病害状态等数据，建立数据量化表征指标及其相关性评价模型，研究多因素耦合作用下沥青混凝土路面服役特征演变规律。
2026.06.01 — 2026.11.01	多尺度分析沥青混凝土梯度自愈合过程，提出沥青混凝土路面梯度自愈合行为多尺度表征方法与效果综合评价体系。
2026.11.01 — 2027.03.01	解析沥青混凝土材料梯度自愈合基因及其影响因素与优化需求，提出自愈合性能靶向调控方案。
2027.03.01 — 2027.08.01	优选不同极性和介电损耗角的添加剂材料，研发满足自愈合性能需求的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料。
2027.08.01 — 2027.12.01	明确微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量影响关键因素，提出针对性施工质量控制技术，并在实体工程中验证优化。
2027.12.01 — 2028.03.01	撰写研究报告，修改完善并准备结题验收。

四、项目经费

项目总经费：80.00 万元
 交通运输厅补助：19.96 万元
 自筹资金：60.04 万元

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.96	合 计	80.00	19.96	60.04
工程配套研究经费	0.0	（一）直接费用	68.2	16.46	51.74
单位自筹	60.04	1.设备费	0	0	0
其他经费	0.0	（1）购置设备费	0	0	0
		（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	50.96	9.96	41.0
		（1）材料费	13.0	3.0	10.0
		（2）测试化验实验加工费=	6.0	1.0	5.0
		（3）燃料动力费	4.0	1.0	3.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	17.5	2.5	15.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	6.5	1.5	5.0
		（6）其他费用	3.96	0.96	3.0
		3.劳务费	17.24	6.5	10.74
		（1）专家咨询费	8.5	3.5	5.0
		（2）聘用人员劳务费	5.0	2.0	3.0
		（3）其他劳务费	3.74	1.0	2.74
		（二）间接费用	11.8	3.5	8.3
		4.管理费	4.8	1.5	3.3
		5.绩效支出	7.0	2.0	5.0

五、项目绩效目标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1.专利授权数（项）	2
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	1
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	1
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		（1）小试	是/否 ☒
		（2）中试（样品样机）	是/否 ☒
		（3）小批量	是/否 ☒
		（4）规模化生产	是/否 ☒
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		2. 培养高层次人才	
		（1）博士、博士后	
		（2）硕士	
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	是/否 ☒
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称“中交一公院”），始建于 1952 年（中央人民政府交通部西北公路管理局设计公司），目前是世界 500 强企业中国交通建设股份有限公司的全资子公司，是国家工程勘察、设计、咨询、监理与科研骨干企业之一，也是我国公路勘察设计行业最早获得“中国勘察设计单位综合实力百强”称号的企业。

中交一公院现有职工 3000 余人，其中外籍院士 1 人，国家勘察设计大师 2 人，享受国务院特殊津贴 20 人，百千万人才 1 人，交通科技青年英才 2 人，在站博士后 4 人；全员中级以上专业技术职称人员占比逾 50%，各类职业注册人员近 200 人，形成了专业结构合理、梯队层次分明的人才队伍。

中交一公院始终坚持以科技进步为先导，以技术创新支撑和引领企业发展，构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系，被业界誉为“一院创新模式”。目前拥有高寒高海拔地区道路工程结构与健康重点实验室、中交寒区旱区重点实验室、多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室、陕西省公路交通防灾减灾重点实验室、西安市桥梁安全技术及装备工程实验室、陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室（共建）、桥梁结构安全技术国家工程实验室（共建）、国家博士后科研工作站、陕西省首批“三秦学者”岗位等多个国家级及省部级科技创新与科技人才平台。先后被授予全国

创新试点企业（第五批）、陕西省创新型企业（第一批）、国家高新技术企业、全国交通建设科技进步先进集体、交通运输行业优秀科技创新团队、陕西省产学研联合开发先进集体等荣誉称号，为科技创新提供了坚实的后盾。

项目负责人：（全面负责该项目的研究工作）

闫亚鹏，陕西洛南人，正高级工程师，长安大学道路与铁道工程专业工学硕士，在读同济大学交通运输专业中组部国家专项博士，现任中交一公院公路绿色智能养护技术研发中心副总工程师，兼任长安大学、北京建筑大学、西安财经大学校外硕士研究生导师，陕西省科技发展计划项目评审专家、陕西省综合评标评审专家库专家、陕西省政府采购评审专家、西安市科技专家、广东省基础与应用基础研究基金项目评审专家。长期从事道路建养新材料、新技术、公路管养模式体系的研究及应用，负责或参与了国家重点研发计划等国家级和省部级科研项目 20 余项；参编行业标准 3 项、地方及团体标准 12 项；申请企业级工法 2 项；先后获得省部级科学技术一等奖 1 项、科技进步二等奖 4 项，科技进步三等奖 3 项，授权国家专利及软件著作权近 20 项，在国内外核心期刊发表论文 20 余篇。

技术总负责：（总体负责该项目的技术工作）

曹海波，正高级工程师，东南大学道路与铁道工程专业工学硕士，重庆交通大学博士，现任中交一公院瑞通公司研发中心主任，兼任公路绿色智能养护技术研发中心总工程师。工作以来一直从事公路建设及养护设计、道路新材料、新技术和装备的研究，主持并参与了十余

项国家及省部级科研项目，先后获得省部级科技进步奖二等奖 4 项，省部级科技进步奖三等奖 2 项，申报国家专利 8 项，参编行业和地方标准 6 项。在国内外核心期刊发表学术论文 10 余篇。对于道路材料、道路施工设备的研究开发经验丰富。

项目组其他成员主要为中交一公院公路绿色智能养护技术研发中心骨干人员，分别承担了该项目中设备开发、试验测试、仿真模拟等工作。

七、项目参加人员表

项目承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司						
参与单位（排序）：						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作 签名
1	闫亚鹏	1987.04	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级工程师/ 研发中心副总工	道路工程	项目负责人 闫亚鹏
主要研究人员						
2	曹海波	1982.04	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级工程师/ 研发中心主任	道路工程	技术总负责 曹海波
3	陈团结	1975.07	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	正高级工程师/ 院副总工、分公司总工	道路工程	技术咨询 陈团结
4	刘洋	1981.12	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	高级工程师/ 分公司行政总监	公路工程	分项负责 刘洋
5	张睿轩	2000.07	长安大学	/	交通运输规划与管理	分项负责 张睿轩

6	赵明	1982.06	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师	道路工程	分项负责	
7	樊孟孟	1988.02	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师	道路工程	分项负责	
8	成超	1984.12	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师/分公司 运营管理部部长	公路工程	分项负责	
9	郑娇萌	1999.08	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	助理工程师	道路工程	分项负责	
10	张立东	1990.08	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师/分公司 运营管理部副部长	公路工程	工程示范	
11	苗思雨	1991.11	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	工程师	道路工程	材料开发	
12	韩烧烧	1989.10	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师	道路工程	数据分析	
13	王殿驭	1994.09	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	工程师	道路工程	试验测试	
14	马明	1987.03	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师	数字化	数学模拟	
15	屈腾	1984.11	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级经济师	对外汉语	数据分析	

16	王晓光	1991.09	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	高级工程师	数字化	数学模拟	王晓光
17	臧晓宁	1993.05	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	工程师	其他	试验测试	臧晓宁

八、信息表

项目合同编号		25-43K		密级		/		A：机密 B：秘密 C：内部			
项目名称		面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用									
项目实施所在地		陕西西安		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月					
总 经 费		80.0		厅 拨		19.96					
第一承担单位	单位名称		中交第一公路勘察设计研究院有限公司								
	所在地		陕西省西安市雁塔区				代码		610113000000		
	通讯地址		陕西省西安市高新区科技四路 205 号				邮编		710075		
	单位性质		(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他				代码		31		
参与单位	序号	单 位 名 称									
	1										
	2										
	3										
项目负责人		姓 名	闫亚鹏		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1987.04		
		学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其他								
		职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他								
		联系电话	18991159930/ 029-88853000		电子邮箱		359706437@qq.com				
项目联系人		姓名	王殿驭		性别		男				
		联系电话	17392875820/ 029-88853000		电子邮箱		397675716@qq.com				
项目组人数		15	高级	11	中级	3	初级	1	其他		
主要研究内容 (100 字以内)		基于双碳目标，通过分析路面服役特征与自愈合行为，研究材料性能调控方案，研发面向双碳目标的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料，形成施工质量控制技术并进行工程验证，以实现路面裂缝的智能、高效与绿色修复。									
成果属性		A、C	A：新技术 B：新工艺 C：新材料 D：新产品 E：软科学 F：装备 G：其他								
成果形式		A、C	A：专著、论文 B：样机、样品 C：试验工程、产品 D：示范工程 E：产品 F：其他								

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式拾份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067



（公 章）

合同乙方：

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：

中交第一公路勘察设计研究院有限公司



2020年3月27日

（公 章）



财务负责人：（签字）

账 户 名：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

开户银行：中国农业银行股份有限公司西安科技二路支行

账 号：26127101040000725

李 亮 育 辉

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本单位承诺在科研项目实施过程中，遵守科学道德和科研诚信要求，严格执行《陕西省交通运输厅科研项目管理办
法》的规定和科技项目合同书约定，保证所提交材料的真实性，确保专款专用。如违背以上承诺，愿意承担相关责任，并同意主管部门将相关失信信息记入公共信用信息系统。



项目承担单位：（盖章）

项目负责人：闫如鹏

年 月 日

项目编号：25-43K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合
材料研发与应用

申请单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司（盖章）

联系人：闫亚鹏

电 话：189 9115 9930



陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

应用技术、信息化类及软科学类

编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

沥青路面自愈合技术的概念是受自然界的启发而提出的，人们希望沥青路面材料在受到损伤时形成的缺陷可以像树干修复自身损伤、皮肤的伤口自己愈合止血一样能够自我愈合。本项目中沥青混凝土路面梯度自愈合是指通过材料组分梯度化设计，使路面表层、中面层具备差异化微波响应能力和愈合性能，匹配不同深度裂缝愈合需求的精准愈合技术；核心技术方式为“不挖除、不扰动原路面”的微波原位加热养护，既可应用于既有路面早期裂缝修复，也可在新建路面铺筑时拌合入梯度自愈合材料，后期通过微波加热激活自愈合功能。

自愈合沥青路面技术在沥青混凝土路面养护方面的应用日益受到重视。沥青是一种具有自愈性的材料，即外界环境温度在沥青玻璃点温度之上，沥青便会自行愈合损伤。具有自愈合功能的沥青类材料自愈合方法目前研究较多的是聚合物材料自愈合技术和加热自愈合技术。其中聚合物材料自愈合技术包括微胶囊法、离子聚合物法等方法，此类方法自愈合效果有限，且自愈合次数较少，离实用性尚有较大距离。因此，目前具有规模化应用潜力的自愈合沥青路面技术主要为加热自愈合的方法。

现阶段，沥青路面加热主要是采用红外、热风或微波的形式来实现的，其中微波加热方式具有环保、高效等优势，可以实现微波场内

材料的均匀加热。但沥青路面筑路材料本身对微波的响应能力欠佳，因此需从道路铺筑阶段入手，改性沥青混合料，开发新型路面材料，提高混合料整体对微波的敏感性，利用材料特性来修复沥青路面早期病害。

目前，沥青路面自愈合技术仍存在以下问题：

（1）现阶段沥青混凝土路面自愈合行为及表征方法尚不明确，缺乏科学合理的评价方式；

（2）沥青混凝土路面自愈合技术存在材料制备工艺复杂、红外或者热风加热自愈合技术整体升温速度慢、加热不均匀的问题；

（3）沥青混凝土路面自愈合技术只具备单次自愈合能力，红外或者热风加热自愈合技术理论上能够实现多次修复沥青路面，但是实际应用中存在易造成沥青路面局部温度过高而导致材料损伤等问题；

（4）沥青混凝土路面自愈合技术、红外加热自愈合技术和热风加热自愈合技术存在施工成本高，不利于大规模应用。

因此，研发新型沥青混凝土路面自愈合技术迫在眉睫，这不仅是提升路面耐久性和降低养护成本的必然选择，也是应对日益严峻的交通需求、环境保护要求以及气候变化挑战的重要措施。通过创新材料和技术的结合，实现更安全、经济和可持续的道路基础设施建设，推动行业的全面进步与发展。

《面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用》研究的必要性源于国家“双碳”战略的顶层驱动、公路基础设施可持续发展的行业诉求，以及传统路面养护模式在效能、成本与环保方面

日益凸显的瓶颈。

具体而言，项目研究的必要性主要体现在以下四个层面：

（1）战略层需求：响应“双碳”战略，推动行业绿色转型

项目必须紧密契合国家“碳达峰、碳中和”重大战略，以及交通运输部关于绿色交通、节能减排的系列部署。传统路面养护过程中，材料生产、运输、摊铺等环节碳排放强度高，且频繁的封闭施工导致交通拥堵，间接增加了社会车辆的碳排放。本项目研发的微波激活自愈合技术，旨在实现“非开挖、原位修复”，大幅减少新材料消耗与施工机械作业，从源头上降低养护活动的碳足迹，是交通领域落实“双碳”目标的具体实践。

（2）技术层需求：突破自愈合技术瓶颈，实现效能跃升

①解决传统自愈合技术的局限性：当前主流的微胶囊、离子聚合物等自愈合技术存在愈合效率低、愈合次数有限、工艺复杂、成本高昂等问题，难以规模化应用。而红外、热风等加热方式存在升温慢、加热不均、易导致沥青老化等缺陷。项目亟需开发一种高效、均匀、可控、可重复激活的新型自愈合技术体系。

②实现梯度自愈合的精准调控：路面裂缝在不同深度处的损伤程度和愈合需求不同。项目需求在于理解并实现“梯度自愈合”，即材料在不同深度层面具备差异化的愈合能力与响应特性，确保修复效果从表及里均达到最优，而非简单的整体加热，这对于修复质量和材料耐久性至关重要。

③构建科学的表征与评价体系：自愈合行为涉及宏-观-微-纳多个

尺度，目前缺乏统一、科学的表征方法与效果评价标准。项目需要建立一套能够量化分析自愈合过程、准确评估愈合效果的综合性评价体系，为材料研发和工艺优化提供理论依据和评判标准。

（3）应用层需求：提升养护效能，降低全寿命周期成本

①延长路面使用寿命：通过及时、有效的自愈合，阻止微裂缝扩展为宏观病害，显著延长路面的大中修周期。需求目标是将路面使用寿命提升 20%以上，从根本上减少大规模翻修带来的资源投入与环境扰动。

②降低养护成本与交通影响：微波自愈合技术可实现快速、局部、原位修复，与传统铣刨重铺工艺相比，预期可降低养护直接成本 30%以上。同时，施工时间大幅缩短，对道路交通的干扰降至最低，社会效益显著。

③实现材料的低碳环保属性：研发的微波敏感型材料本身需满足低碳环保要求，优选工业副产物或可再生资源作为添加剂，降低材料生产过程中的碳排放，并与微波高效清洁能源相结合，形成全链条的绿色技术方案。

（4）产业层需求：培育新材料产业链，形成技术标准

①带动新材料产业发展：微波敏感型功能材料的成功研发与规模化应用，将催生一个新的细分材料产业，带动上游添加剂生产、中游沥青混合料制备及下游养护装备制造的发展。

②形成技术规范与标准：项目成果需最终沉淀为可推广的技术指南、工法或标准，为行业提供从材料设计、混合料组成、施工工艺到

质量检验的完整技术依据，填补该领域标准空白。

综上所述，项目通过机理研究-材料创新-工艺开发-工程验证的全链条研发，攻克沥青混凝土路面梯度自愈合的核心技术难题，形成一套技术先进、经济合理、环境友好的完整解决方案，为实现公路基础设施的“长寿命、低维护、绿色化”可提供强有力的科技支撑，项目研究工作极为必要。

二、前期科研及工作基础

1. 研究现状

(1) 国内外自愈合修复沥青路面技术研究现状

自修复路面研究方面, Deacon 早在 1965 年提出了沥青的自修复的理念, 后来大量实验开展起来, 大大推进了此项研究^[1-3]。1976 年, Bazin 等首次提出了沥青混合料的自修复特性, 其中对比室内连续加载实验和室外实际使用中沥青混凝土路面的疲劳寿命与加载时间的关系以及对两者间转移系数进行研究时发现, 在一定的间歇期下, 沥青混凝土路面的性能会有所恢复和疲劳寿命有所延长, 这都表明沥青材料具有自修复性能, 但其自愈合能力很弱^[4]。

国外部分学者已经开始研究采用添加剂来诱导和增强沥青混凝土的自愈合能力, 以提高沥青混凝土的耐久性及养护速率。Bommavaram 等在 2009 年发现某些填料可提高沥青混凝土的疲劳自愈合速率; 同年, Qiu 研究了分子以及纳米水平的聚合物材料增强沥青混合料自愈合性能的技术措施, 并分析了各中记述的优缺点^[5]; Garcia 等采用多孔砂作为修复剂的载体, 用环氧树脂和细砂裹覆其外形成胶囊壁, 制备了含有修复剂的胶囊颗粒^[6-8]。日本学者三桥博三教授, 在混凝土中加入了内部包含有粘结剂的空心胶囊, 分别用量水玻璃、西施水玻璃及环氧树脂三种修复材料, 对混凝土进行修补, 修补后分别制作了龄期为 7 天和 28 天的试样, 分别测试了三种修复材料修补后试样的强度恢复。

2010 年 12 月, 荷兰政府在 A58 高速公路上铺筑 400m 自修复沥

青混凝土的试验段，采用普通沥青混凝土掺加导电 0.8% 钢丝棉制成。拟定期对路面进行干预加热，使沥青路面的寿命延长至 20 年。2010 年之后对试验段进行了一系列实验表征其性能。2015 年 4 月对试验段进行了第一次感应加热修复。

近些年，国内许多道路科技工作者已经开始就沥青路面微波自愈合技术开展相关研究工作，为加热自修复技术的应用推广奠定基础，如：盐城工学院的马如宏教授通过对微波的研究，从微波的原理和特点阐述了微波加热技术在沥青路面现场维修中的应用。东南大学的朱松青教授通过建立微波加热模型与试验证实了微波加热通过辐射热传递能实现瞬间体积加热，具有快速、加热均匀、保证质量和无污染等优点^[9-10]。长安大学的郝培文教授与美的集团威特公司的合作下通过试验分析了微波加热沥青混合料和红外加热沥青混合料的路用性能。包括高温变形特性、低温抗裂性、水稳性和抗疲劳特性，试验结果表明：微波加热沥青混合料具有较红外加热和普通密级配沥青混凝土更好的路用性能，并且通过室内试验研究了微波加热沥青混凝土路面的均匀性并初步得出了微波加热沥青混凝土路面的最佳厚度^[11-13]。

国内自修复混凝土主要研究机构集中在高校，如：同济大学、武汉理工大学、重庆交通大学、东南大学、长安大学等。国内主要研究成果有：①掺加钢渣、钢纤维或铁相材料可以增强沥青混凝土自愈行为，从而延缓裂纹和掉粒的产生，探究含铁物相的沥青及混合料自愈合行为。②感应加热可以有效修复微裂纹，阻止其扩展成宏观裂缝等病害，探究了感应加热自愈合行为及梯度老化行为。上述成果均能提

高沥青混凝土的路面养护效率。

（2）国内外微波加热技术研究现状

微波是一种频率范围在 300MHz 至 3000GHz 的超高频电磁波，因其独特的穿透性、选择性、低热惯性及丰富的信息传输特性，已广泛应用于国内外多个领域。从国防卫星通信到民用微波炉，微波技术的应用无处不在。在道路工程领域，由于其出色的加热特性，微波技术在沥青再生方面也展现出重要的应用潜力。

微波加热技术在国外研究起步较早。20 世纪 70 年代初，Bosisio 等人在微波加热沥青路面的理论基础上进行了实验，验证了其可行性。1982 年，ANON 和 Jeppson 等人通过研究发现，常规加热方式下沥青旧料的回收率为 40%至 60%，而采用微波加热，旧料回收率可达 100%。相较之下，国内对微波技术的研究起步较晚，直到 20 世纪 90 年代末才开始相关实验。尽管自主研发的微波再生设备逐渐涌现，但由于能耗较高、加热效果不理想，微波再生技术在市场中的推广并不乐观。这主要是因为沥青对微波不敏感，导致升温速度缓慢；此外，微波穿透性强，大部分能量穿过路面表层，能量利用率低，作用时间长。

近年来，国内多位学者开始关注微波加热技术在沥青路面中的应用。由于沥青混合料微波加热性能较差，现有技术存在微波养护效率低导致微波这种技术运用到公路养护中的发展变得相当缓慢。国内外大量科技工作者对改变沥青混合料组成提高其微波加热性能进行了大量的研究。Wang JZ 等学者研究了碳纤维的不同掺量对沥青混合料

力学性能,吸波性能的影响。结果表明,混合料掺入碳纤维后力学性能有了很大的提高。在掺量为 0.45% 时,混合料在 2.3~2.6 GHz 频率范围的最小反射率达到 -13.5dB,说明碳纤维掺入可明显提高混合料吸收微波的能力^[14]。长安大学郭德栋等金属铁粉部分替代沥青混合料中的矿粉细集料,明显改善了沥青混凝土路面的吸波性能,可大幅度提高微波除冰效率。长安大学沙爱民课题组通过室内试验研究了磁铁矿集料的技术性质以及磁铁矿沥青混合料的路用性能,根据磁铁矿石的特点和微波除冰作业的要求,在磁铁矿沥青混合料的组成设计中提出了磁铁矿集料的技术标准、矿料级配设计方法以及混合料抗收缩裂缝能力的检验指标和方法。但其主要考虑沥青混合料应在加热后具有良好的抗温度收缩开裂的能力,以满足融雪除冰作业后温度急剧下降的需要,并未充分考虑磁铁矿石粒径分布、掺量等因素对于微波加热升温效率的影响,同时受地域及运输条件限制,磁铁矿石作为路用碎石集料,难以在新建路面工程中大范围应用^[15-17]。

钢纤维不仅可以提高混凝土的抗弯拉强度,起到增韧阻裂的作用,还可以调节混凝土的电磁参数,赋予混凝土以吸波功能。Gallego 的研究表明,将钢纤维作为沥青混凝土中的微波吸收成分有一定可行性,在加入沥青混凝土质量 0.2% 的 10mm 长钢纤维后,经微波照射 120s,表面温度可达 140℃ 以上^[18]。Liu 对比研究了不同钢纤维长度与用量下的感应加热速率,认为钢纤维长度为 9.5mm,用量为 8% 沥青体积用量的条件下感应加热速率最大,180s 照射后表面温度超过 130℃。钢纤维沥青混凝土的电磁波吸收能力毋庸置疑,但在微波频

段下, 其发热能力如何, 尚缺乏研究^[19]。

金属微粉吸波材料是指包括羰基铁粉、羰基镍粉、钴镍合金粉等材料在内的磁性金属微粉, 其粒径一般介于 $0.5\ \mu\text{m} \sim 20\ \mu\text{m}$ 。金属微粉的最大特点是可以通过调整其粒径来控制其电磁参数。王振军研究了羰基铁粉 (CIP) 对沥青混凝土微波吸收能力的影响, 研究发现在 2.45GHz 微波照射下, CIP 与沥青质量比为 $0.1:1.5$ 的 30mm 厚沥青混合料微波吸收能力最强, 达到 -19.1dB , 其微波升温速率是普通沥青混合料的 16 倍。赵鹏将直径小于 $75\ \mu\text{m}$ 、四氧化三铁质量比大于 40% 的羰基铁粉等量替代石灰石矿粉掺入沥青混凝土中, 试件经 2.45GHz 微波照射 40s 后升温 46°C ^[20]。

在微波加热沥青混合料加热性能检测及能量转换研究方面, Mitchell 等学者开发了一种快速、环保的为沥青路面现场提供加热的仪器。试验测试了这种仪器的加热均匀性、最佳加热深度和水分对加热性能的影响。结果表明, 各加热层上的标准温度偏差都小于 7°C , 呈现良好的加热均匀性, 加热深度约为 10cm , 路面上的水会降低微波辐射的加热效果, 应在加热前清除^[21]。Sun TS 为提高沥青混合料在微波加热过程中的能量转换效率, 研究了沥青混合料的关键特性参数, 讨论了沥青混合料电场强度和介电损耗的衰减规律, 建立了热场和电场之间的转换模型。结果表明: (1) 随着微波测量深度的增加, 电场强度逐渐衰减; (2) 沥青混合料的电场强度随介电常数的增大而减小; (3) 提高内热源的活性可显著提高沥青混合料的温度^[22]。

在专利申请与授权方面, 国内外主要集中在在混合料中掺加磁铁

矿石及金属粉等材料的方法上，如申请号为 CN201810230100.1 的专利介绍了一种吸收微波的沥青混凝土路面材料组合物，主要包括硫铁矿烧渣粉、碳纤维粉、铁燧岩粉、磁铁矿石等。专利 CN101774786A 公开了一种用于微波加热的矿渣沥青混凝土路面材料组合物，通过在道路沥青混凝土制备过程中，添加磁性粉用于全部或部分替代传统沥青混凝土原料中的石灰石矿粉，采用磁性冶金矿渣部分取代传统沥青混凝土原料中的天然粗集料，最终获得的组合物由磁性粉、石灰石矿粉、沥青、磁性冶金矿渣、天然粗集料组成。专利 US9,550,681 公开了一种具有微波加热功能的沥青混凝土，主要由雌黄铁矿石和黄铜矿石组成，其中包括部分的石墨粉。

2.工作条件

(1) 支撑条件

本项目申请单位为中交第一公路勘察设计研究院有限公司（以下简称我院），始建于 1952 年（中央人民政府交通部西北公路管理局设计公司），目前是世界 500 强企业中国交通建设股份有限公司的全资子公司，是国家工程勘察、设计、咨询、监理与科研骨干企业之一，也是我国公路勘察设计行业最早获得“中国勘察设计单位综合实力百强”称号的企业。

申报单位现有职工 3000 余人，其中外籍院士 1 人，中国工程院院士 1 人，国家勘察设计大师 2 人，享受国务院特殊津贴 20 人，百千万人才 1 人，交通科技青年英才 2 人，在站博士后 4 人；全员中级以上专业技术职称人员占比逾 50%，各类职业注册人员近 200 人，形

成了专业结构合理、梯队层次分明的人才队伍。

我院始终坚持以科技进步为先导,以技术创新支撑和引领企业发展,构建了具有行业和企业特色的科技创新平台与技术创新体系,被业界誉为“一院创新模式”。目前拥有高寒高海拔地区道路工程结构与健康重点实验室、中交寒区旱区重点实验室、多年冻土区公路建设与养护技术交通行业重点实验室、陕西省公路交通防灾减灾重点实验室、西安市桥梁安全技术及装备工程实验室、陆地交通气象灾害防治技术国家工程实验室(共建)、桥梁结构安全技术国家工程实验室(共建)、国家博士后科研工作站、陕西省首批“三秦学者”岗位等多个国家级及省部级科技创新与科技人才平台。先后被授予全国创新试点企业(第五批)、陕西省创新型企业(第一批)、国家高新技术企业、全国交通建设科技进步先进集体、交通运输行业优秀科技创新团队、陕西省产学研联合开发先进集体等荣誉称号,为科技创新提供了坚实的后盾。

申报单位拥有交通部公路工程试验检测综合甲级资质和桥隧甲级专项资质,实验厂房建筑面积 7000 多平方米。配备有 GDS 三轴仪、MTS 试验机、UTM 试验机、Carl Bro 落锤式弯沉仪、道路探测雷达、多功能电法工作站、公路数字综合检测车、桥梁检测车等先进的大中型试验与检测设备 300 多台(套),仪器设备总值 6000 多万元。

作为行业大院,中交一公院自成立以来一直是全国交通行业技术创新中的主力军,在我国同行业中具有较强的技术优势。建院 60 年来,累计承担各类纵横向科技开发项目 200 余项。拥有国际专利、国

家专利、计算机软件著作权授权 140 余项。凭借丰富的工程实践经验与技术实力,我院在现代公路勘测设计技术(特别是山区高速公路)、长大公路桥隧工程技术、地质勘察与减灾防灾技术、特殊路基与地基处治技术、道路维修改造与加固技术等专业领域取得了丰硕的科技创新成果,拥有“公路数字化集成勘测设计技术”、“多年冻土区公路建设与养护技术”、“桥梁参数化智能化标准化集成设计技术”、“基于区域环境和交通特征的路面设计与分析技术”、“公路交通安全评价设计技术”等“五大”核心技术体系和“九大”优势技术领域,为交通运输行业各类工程建设提供了宝贵的经验。

(2) 准备工作情况

我院前期承担交通运输部企业技术创新项目《沥青路面无损温再生技术研究》(项目编号:2014315490010),在复配的 SBS、芳烃油和 SR 体系中通过物理方法加入微波敏感粉料的方法开发出了一种微波敏感型沥青路面无损温再生剂。同时,通过对微波辅助方式的研究,结合结构设计和优化,设计了特殊的径向螺旋天线紧凑排列方案,实现了微波辅助的均匀性和工作性,利用金属网屏蔽喇叭口径平面以下的辐射,同时考虑实际工作环境,研发了一种微波辅助渗透墙。并将该核心墙体集成到车,集成一款以微波为辅助渗透方式的沥青路面辅助养护车。

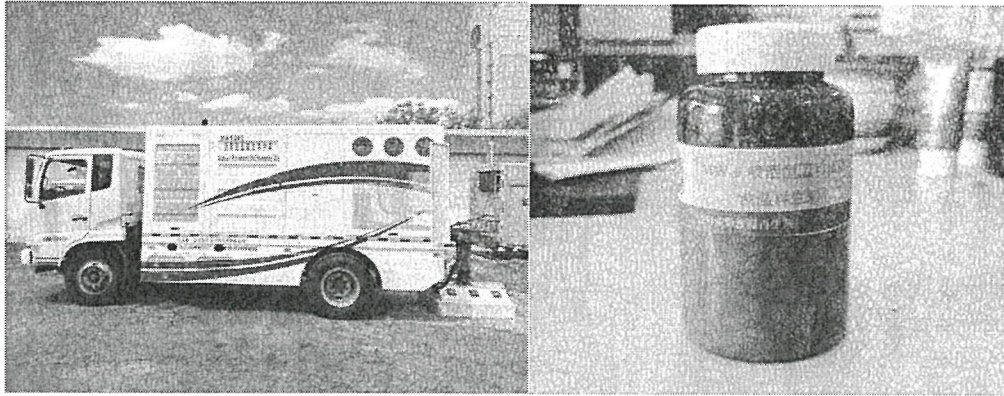


图 1 沥青路面辅助养护车及微波敏感型沥青路面无损温再生剂

同时，还承担了横向科研项目《久储二阶加热型沥青路面坑槽快速修补材料研究及应用》，依托该项目制备了基于微波的久储二阶加热型沥青路面坑槽快速修补材料，并研究了其微观结构及作用机理。在现有沥青路面热再生技术之上，研究了久储二阶加热型沥青路面坑槽快速修补技术的混合料组成设计，形成了系统的久储二阶加热型沥青路面坑槽快速修补材料设计方法，并对该材料的各项目性能进行评价，最终检测该混合料的施工和易性、路用性能和耐久性均达到了规范对热拌沥青混合料的要求。

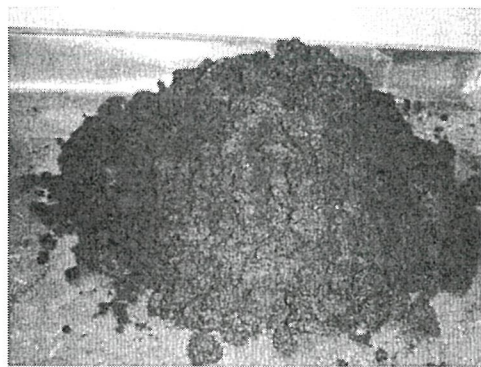


图 2 久储二阶微波加热型沥青路面坑槽快速修补

上述项目的科研成果及研究经验本项目奠定基础，提供了微波及

道路养护领域的宝贵经验，自主研发了沥青路面辅助养护车，为本项目就地温再生再生装备的改造升级提供了基础条件。

(3) 实现课题目标的主要措施

1) 人员

公路绿色智能养护技术研发中心成立于 2008 年，是中交第一公路勘察设计研究院有限公司研发部门中重要成员之一，也是中交瑞通路桥养护科技有限公司的核心研发团队。拥有核心研发人员 40 余人，其中博士 7 人，硕士 27 人。公路绿色智能养护技术研发中心在陈团结博士的带领下，经过十几年的潜心研究，在道路及桥梁养护技术、材料、装备等方面取得了一系列丰硕的成果。先后获得国际发明专利 2 项，国家发明专利 30 余项，省部级科技奖励一等 3 项，二等奖 10 余项。拥有自主开发的养护分析软件 PavMaster®、桥梁加固分析软件以及绿色公路评价分析软件，同时主编了行业标准 2 部，地方及协会团体标准 12 部，多项核心技术分别入选交通运输部成果库、交通运输部交通运输建设科技成果推广目录、科技部国家重点新产品目录。同时科研成果在多个项目得到成功推广应用，取得了良好的社会、经济和环保综合效益。

公路绿色智能养护技术研发中心将具体负责本项目立项申报、工作大纲、调研、编制、统稿、组织评审等具体工作。项目组的研究人员具有丰富的科研工作经验和较高的学术水平，能保证项目研究工作的顺利实施。

2) 管理

为保证本项目能够高质、高效按期达到预定目标,必须建立全面、高效的组织管理机制。

本项目研究依托公路绿色智能养护技术研发中心丰富的人力资源、专业知识和广泛业务领域为支撑,以项目负责人为课题组织管理主体,由具有博士、硕士学位的专业技术人员组成课题组开展研究工作。

根据项目研究内容划分为不同分项,由分项负责人负责,建立各分项研究小组,将项目组研究成员划分在各小组内,各小组组员对小组负责人负责,小组负责人对项目负责人负责。项目立项后,由公路绿色智能养护技术研发中心总工程师负责整个项目进度、质量监督工作。各分项研究小组按年度计划进度提供季报,项目组定期召开协调会,并进行专家咨询。通过高效、规范的组织管理,充分发挥各类资源、人才优势,高质高量的实现本项目目标。

(4) 技术装备条件

本项目承担单位拥有交通部公路工程试验检测综合甲级资质和桥隧甲级专项资质,实验厂房建筑面积 7000 多平方米。配备有 GDS 三轴仪、MTS 试验机、UTM 试验机、Carl Bro 落锤式弯沉仪、道路探测雷达、多功能电法工作站、公路数字综合检测车、桥梁检测车等先进的大中型试验与检测设备 300 多台(套),仪器设备总值 6000 多万元。2008 年交通运输部批准依托中交第一公路勘察设计研究院成立了多年冻土区公路建设与养护行业重点实验室,先后投资 3200 余万元配置了相关科研设备和低温环境模拟试验系统,模拟自然环境

下公路的运行状态，研究气候—工程稳定性之间的相互作用关系。已构建了“大型路基模型试验系统、路面结构与材料试验系统、野外监测与检测系统”等工程试验研究平台，目前已建成“1个试验中心、2个野外基地、5个观测站、18个试验场”。

本项目承担单位具有充足的试验设备和试验场地为本项目开发提供条件，以保证本项目可以如期高质量完成。

3.参考文献

[1]S.Shen,T.Sutharsan, Quantification of cohesive healing of asphalt binder and its impact factors based on dissipated energy analysis [J], Road Mater. Pavement Des.2011,12(3): 525- 546.

[2]Y.-R.Kim,D.Little,R.Lytton,Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures [J]. J. Mater. Civ. Eng. 2003,15(1) : 75-83.

[3]AGarc a,Self-healing of open cracks in asphalt mastic,Fuel.2012 (93): 264-272.

[4]Bazin,P.,and Saunier, J.B, Deformability, fatigueand healing properties of asphalt mixes [C]. Proceed.ings of the Second International Conference on theStructural Design of Asphalt Pavements, Ann Arbor,Michigan,USA,1967,553-569.

[5]Qiu J,Molenaar A A A,Ven MFCVD,et dInvestigation of self healing behaviour of asphalt mixes using beam on elastic foundation setup [J]Materials & Stuctures, 2012,45 (5):777-791.

[6]Garefa A,Schlangen E, Van de Ven M,et alPreparation of capsules

containing rejuvenators for their use in asphalt concreteJ.Journal of hazardous materials,2010,184(1-3):603-611.

[7]龚锐翔.基于微胶囊技术的再生沥青及其混合料智能修复技术研究[D].重庆交通大学,2024

[8]朱捷.掺再生微粉及纳米二氧化钛改性的沥青胶浆自愈合性能研究[D].南昌大学,2024.

[9]朱松青,史金飞,孙铜生.微波在沥青路面养护中的应用研究[J].材料导报,2007,21(11A). 286-290.

[10]朱松青,史金飞,姜来东,伍斌.沥青路面微波现场热再生传热模型研究[J].公路交通科技,2009, 26(02):32-36.

[11]美的集团有限公司.磁控管微波消除路面冰雪的方法[P].中国:200710027333,2007-09-05.

[12]美的集团有限公司.一种除雪机[P].中国:200520059734,2006-08-02.

[13]薛亮,郝培文,邹天义等.微波加热沥青混合料特性研究[J].公路,2006,12:188-192.

[14]Wang Z J,Zhao P,Ai T,et al. Microwave absorbing characteristics of asphalt mixes with carbonyl iron powder[J]. Progress in Electromagnetics Research M, 2011, 19: 197-208.

[15]沙爱民.环保型路面材料与结构[M].北京:科学出版社,2012.

[16]何治丽.用于微波加热的能量辐射控制技术研究[D].电子科技大学,2024.

[17]李晨楠.基于时频空域综合调制的微波加热技术研究[D].电子科技大学,2023.

[18]Gallego J, Del Val M A, Contreras V, et al. Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing[J]. Construction and Building Materials, 2013, 42: 1-4.

[19]Quantao Liu,Wan Yu, Erik Schlangen, et al. Unravelling porous asphalt concrete with induction heating[J]. Construct Build Mater,2014,71(71):152

[20]赵鹏,艾涛,王振军,一种用于微波加热的矿渣沥青混凝土路面材料组合物:CN101774786A[P].2010

[21]钱璞,李龙龙.沥青路面养护中微波加热技术的应用[J].道路工程,2011, (15):69-72.

[22]王艳萍.热再生沥青混合料搅拌加热装置热效率研究[J].交通世界,2023,(34):118-120.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

本项目将集中攻克以下三个层面的关键问题：

（1）关键问题一：多因素耦合下沥青混凝土服役特征与梯度自愈行为的关联机制及评价方法缺失

沥青混凝土路面服役过程中，气候条件、交通荷载等多因素协同作用会导致路面病害演化，既影响梯度自愈效果，也增加路面维修能耗与碳排放，与双碳目标要求相悖。本项目结合旧料回收利用实现减碳，目前尚未明确服役特征参数（如荷载频次、温差变化）与梯度自愈行为（如愈合速率、愈合均匀性）的内在关联，缺乏兼顾双碳效益的梯度自愈行为表征与效果评价方法，无法为后续机理探究、材料设计及双碳效益评估提供精准依据。

（2）关键问题二：沥青混凝土梯度自愈微纳观机理模糊及性能调控路径不明确

沥青混凝土梯度自愈涉及多尺度、多物理场耦合作用，本项目以旧料利用为减碳抓手落实双碳目标，目前对其微纳观机理（如微波能量转化机制、沥青分子链扩散重排规律）解析不足，尚未明确各影响因素（如材料组分、微波参数）对梯度自愈性能及双碳效益的调控规律，无法提出兼顾高效愈合与旧料资源化的调控方案，制约了梯度愈合效应的可控实现与双碳目标落地。

（3）关键问题三：微波敏感型梯度自愈材料的协同设计不足及性能平衡难题

面向双碳目标，结合旧料回收利用的现实需求，当前微波敏感组分仍存在诸多关键问题：其介电性能、与沥青混合料及再生旧料的相容性普遍较差，难以兼顾微波敏感性能（快速均匀升温）与基本路用性能（高温稳定性、低温抗裂性等）；此外，该类组分的长周期服役耐久性及多次自愈合能力调控机制尚不明确，缺乏科学的添加剂优选、复配体系与制备工艺，难以实现微波响应性能、路用性能、结构耐久性与双碳效益的协同平衡。

（4）关键问题四：微波敏感型沥青混凝土规模化生产与现场施工的质量可控性不足及标准缺失

面向双碳目标，技术工程化推广需兼顾质量稳定与减碳效益，目前实验室小样制备与工程规模化生产在工艺参数、组分均匀性控制上存在显著差异，缺乏兼顾旧料规模化再生的质量一致性控制技术，无法确保批量生产材料性能稳定可靠；同时，现场施工缺乏配套专用工艺，微波发射设备参数、照射方式及旧料再生施工流程设置不明确，且修复后质量评价方法与双碳相关检验标准空白，无法形成完整的施工-检验技术规程，阻碍技术工程化推广与双碳目标实现。

2. 主要研究内容及实施方案

（1）沥青混凝土路面服役特征及梯度自愈合行为分析

采集沥青路面服役过程中气候条件、交通荷载、病害状态等数据，分析提出各类数据量化表征指标，研究多因素作用下沥青混凝土路面服役特征变化规律；分析沥青混凝土梯度自愈合过程，建立梯度自愈合表征体系，表层侧重愈合速度，中面层侧重粘结强度、结构强度；

采用室内多层试件分层检测、现场钻孔取芯、路面雷达扫描的方式，验证不同深度路面的梯度愈合效果。构建面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合行为表征与效果评价方法。

（2）沥青混凝土材料梯度自愈合性能需求及其调控方案研究

结合室内试验与数值模拟等手段，探究沥青混凝土梯度自愈合微观机理，解析沥青混凝土材料梯度自愈合行为影响因素与优化需求，采用组分梯度设计思路，匹配各层愈合需求；通过室内分层试件微波加热试验、依托工程现场分段验证，评价梯度愈合效果。提出沥青混凝土材料梯度自愈合性能调控方案，分析评估不同调控方案下沥青混凝土材料自愈合效果。

（3）面向双碳目标的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料研发

以双碳目标为导向，优选不同极性和介电损耗角的添加剂材料，分析该材料与沥青混合料的相容性，明确各组分掺配需兼顾微波升温性能与混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性，确保路用性能符合规范要求，确定其最佳配比与添加制备工艺，研发满足自愈合性能需求的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料。

（4）微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料质量控制及应用研究

根据微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料自身特点，明确微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量影响关键因素，提出针对性施工质量控制技术，并在实体工程中进行应用验证，完善双碳相关

评价指标和检验标准。

3. 技术路线

(1) 技术路线

本项目将采用“理论驱动、模型先行、实验验证、迭代优化”的螺旋式研发路径，构建一套完整的技术路线。

第一阶段开展多源数据融合与数字孪生基础构建，在依托工程路段部署包含分布式光纤传感器、微波湿度传感器、动态称重系统和气象站的物联网监测系统，开发数据融合算法，建立包含力学响应指标、环境作用指标和损伤演化指标的路面服役状态评估指标体系，同时开发多尺度几何建模方法，建立考虑温度-老化耦合效应的沥青粘弹塑性模型、基于内聚力模型的裂缝演化规律以及微波敏感材料的电磁-热耦合本构关系。

第二阶段进行多物理场耦合机理与梯度设计理论探索，开发电磁-热-力-化学多场耦合求解器，实现 Maxwell 方程与热传导方程的强耦合求解，引入相场法模拟裂缝愈合过程，建立分子动力学-有限元跨尺度关联方法，提出以愈合效率最大化为目标函数、以路用性能要求为约束条件的功能梯度材料拓扑优化方法，建立包含温度场均匀性指标、愈合深度控制指标和能量利用效率指标的梯度设计评价指标体系。

第三阶段实施机器学习辅助的材料设计与优化，构建收录 200 多种潜在功能材料物化参数的微波敏感材料数据库，开发基于图神经网络的混合物性能预测和深度学习结构-性能关系挖掘的材料性能预测

模型，建立以添加剂种类、掺量、级配、分布为设计变量，以愈合效率、路用性能、成本、碳足迹为目标函数的多目标优化框架，采用多目标遗传算法进行帕累托前沿搜索，开发基于贝叶斯优化的实验设计方法。

第四阶段开展数字孪生驱动的工艺开发与质量控制，开发模拟添加剂在混合料中分布均匀性的搅拌过程离散元模型，建立预测梯度结构成型质量的摊铺压实过程仿真模型，开发基于机器视觉的添加剂分布检测和近红外光谱材料均匀性评估的在线监测系统，建立实现从原材料到成品全链条质量追溯的区块链系统。

第五阶段推进数字孪生赋能的工程验证与优化，构建实时数据驱动模型更新的试验段数字孪生体，开发现场人员通过 AR 设备查看内部状态的增强现实巡检系统，建立基于数字孪生的反馈控制机制，开发基于深度强化学习的养护策略优化和考虑交通影响的多目标决策的智能决策支持系统。

具体技术路线如图 3 所示。

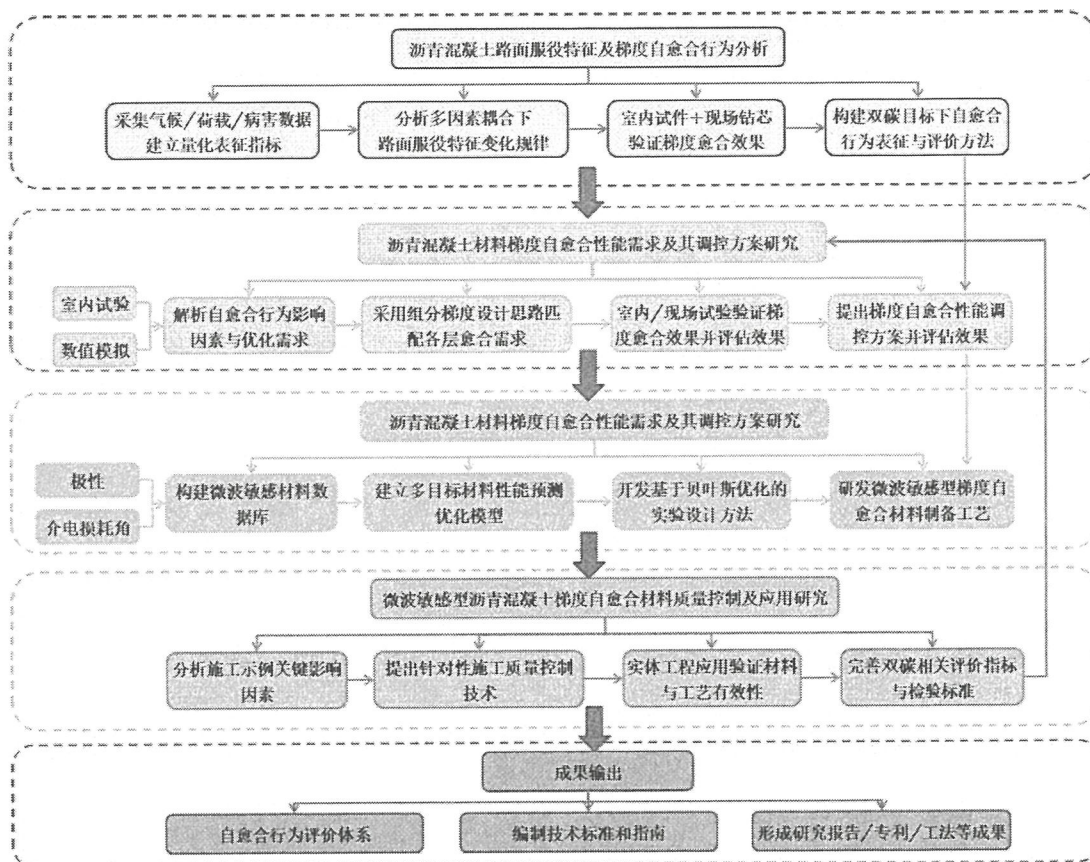


图 3 技术路线图

(2) 工作流程

为确保项目高效、有序推进，本项目实施将采用“双线并行、闭环管理”的工作流程，即“研究主线”与“管理保障线”并行推进，主线工作流程包含六个阶段：

第一阶段数字化基础建设（2026.03-2026.09）：建立数字化协作平台，部署物联网监测系统，构建数字孪生基础框架，开发数据预处理和质量控制算法；

第二阶段机理模型开发（2026.09-2027.03）：开展材料基础性能试验，建立多尺度多物理场耦合模型，开发跨尺度仿真分析工具，进行模型验证和参数标定；

第三阶段智能设计与优化（2027.03-2027.09）：构建材料基因组数据库，开发机器学习预测模型，进行多目标优化设计，制备实验室样品并进行初步测试；

第四阶段工艺数字化开发（2027.09-2027.11）：建立虚拟工艺仿真平台，开发智能质量控制系统，进行工艺参数优化，制备工程级试验样品；

第五阶段数字孪生验证（2027.11-2028.01）：铺筑实体试验段，部署数字孪生监测系统，开展虚实交互验证，进行长期性能跟踪；

第六阶段成果集成与推广（2028.01-2028.03）：完善数字孪生平台，开发决策支持系统，编制技术标准和指南，准备成果推广材料。

具体工作流程如图 4 所示。

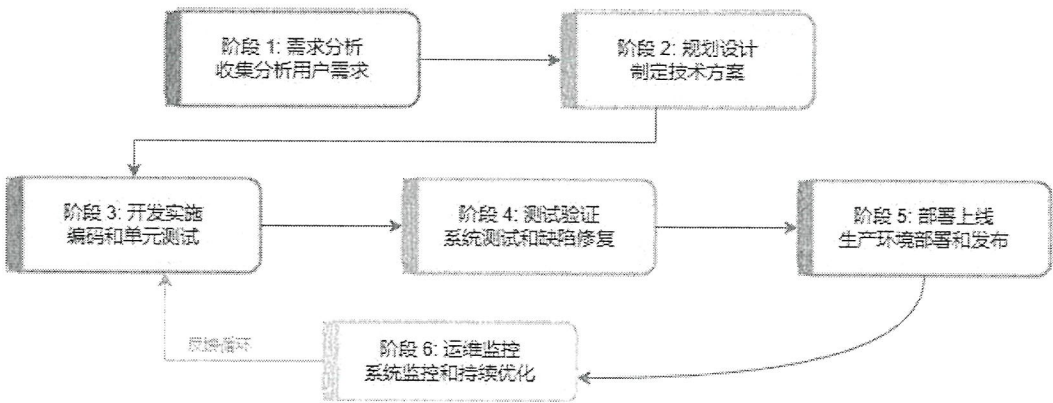


图 4 工作流程图

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目研究成果——《面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用》及其配套技术，具备较高的技术成熟度和明确的

工程适用性,可为后续公路养护领域的技术改造与基本建设提供直接支撑。研究成果不仅可在青银高速陕西境内靖边至王圈梁段等类似交通繁忙、环境复杂路段进行规模化推广应用,还可通过材料配方优化与工艺标准化,推动现有微波加热养护技术的材料升级,提升全行业养护作业的精准性、效率与环保水平。此外,所形成的梯度自愈合材料设计方法、质量控制技术体系及施工工艺标准,通过试点推广、工程示范、标准制定、技术培训等多种方式,可为未来“智慧公路”、“绿色养护”相关基建项目的规划、设计与运维提供关键技术依据,具备较强的成果转化前景和市场需求潜力。

5. 有关技术经济指标

(1) 技术指标

1) 微波照射 10min 内,微波敏感型自愈合沥青混凝土材料温度到达自愈合温度区间;

2) 微波敏感型自愈合材料高温、低温、水稳定等基本路用性能符合规范要求,自愈合后以上性能恢复至原有性能 80%以上;

3) 在微波照射区域下,微波敏感型自愈合沥青混凝土材料温度上升幅度均匀一致,短时间内不会造成沥青老化,无大量烟尘气体排放。

(2) 经济指标

1) 养护维修效率

微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合技术具有施工效率高、能源损耗小、施工成本低、不损伤原路面可多次激活实现路面多次自愈合的

特点，相比传统养护修复方法维修效率提高 50%以上。

2) 全寿命周期费用

针对传统修复方法（沥青混合料采用 SBS 改性沥青 SMA-13）和微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合修复，采用全寿命周期费用分析方法分析全寿命周期费用，相比于常规沥青混凝土每平方可节省费用 40%以上。

3) 双碳评价指标

每再生利用 1 吨 RAP 料可减少 0.25 吨的二氧化碳排放，采用微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合技术可在现有基础上 RAP 料利用率提高 50%。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

中交第一公路勘察设计研究院有限公司（简称中交一公院）始建于1952年，前身为交通部公路总局设计第五分局，后更名为交通部第一公路勘察设计院，现隶属中国交通建设股份有限公司，是我国公路工程勘察、设计、研究、咨询领域大型骨干企业，在全国交通系统最早跻身“中国勘察设计单位综合实力百强”之列。

60年来，中交一公院共承担了近8万公里的公路勘察设计任务，其中高等级公路近万公里；勘察设计桥梁7万多延米，其中特大型、大型桥梁500多座；勘察设计隧道16万多延米，其中长大隧道40多座；所勘察设计项目遍布全国30个省市自治区，业务范围涉足亚非地区18个国家。公司先后荣获国家科技进步奖、国家优质工程奖、鲁班奖、詹天佑土木工程奖、省部级特奖、优秀勘察设计奖等200多项，为我国交通事业发展建立了卓越功勋。

中交第一公路勘察设计研究院有限公司拥有国家级博士后科研工作站1个、交通行业重点实验室（部级）1个、交通部甲级试验检测中心（部级）1个、中交股份的区域技术研发中心（国有大型企业集团，相当于省部级）1个、9个专职研究机构，研究人员400余人，能够为本项目的顺利实施提供基础。

2. 技术力量及人员构成

项目负责人及核心成员涵盖道路工程、材料科学、数字化仿真等专业，形成了多学科交叉的团队结构。团队不仅拥有扎实的理论基础，

更具备丰富的工程实践能力，能够确保研究成果既具创新性，又具备工程落地性，具体技术力量及人员构成如下表所示。

表 1 技术力量及人员构成情况表

姓名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担 任具体工作
闫亚鹏	中交第一公路勘察设计 研究院有限公司	男	1987-04 -10	正高	道路工程	项目负责人
曹海波	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1982-04 -12	正高	道路工程	技术总负责
陈团结	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1975-07 -09	正高	道路工程	技术咨询
刘洋	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1981-12 -23	高工	公路工程	分项负责
张睿轩	长安大学	男	2000-7- 1	/	交通运输 规划与管 理	分项负责
赵明	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	女	1982-06 -10	高工	道路工程	分项负责
樊孟孟	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1988-02 -21	高工	道路工程	分项负责
成超	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1984-12 -28	高工	公路工程	分项负责
郑娇萌	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	女	1999-08 -11	助理	道路工程	分项负责
张立东	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1990-08 -11	高工	公路工程	工程示范
苗思雨	中交第一公路勘察设计研 究院有限公司	男	1991-11 -09	工程师	道路工程	材料开发

韩尧尧	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	1989-10-02	高工	道路工程	数据分析
王殿驭	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	1994-09-06	工程师	道路工程	试验测试
马明	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	1987-03-07	高工	数字化	数学模拟
屈腾	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	1984-11-10	高工	对外汉语	数据分析
王晓光	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	男	1991-09-06	高工	数字化	数学模拟
臧晓宁	中交第一公路勘察设计研究院有限公司	女	1993-05-18	工程师	其他	试验测试

3. 各自承担的主要工作

承担单位：中交第一公路勘察设计研究院有限公司

(1) 项目立项申报及组织管理工作；

(2) 负责沥青混凝土路面服役特征及梯度自愈合行为分析、沥青混凝土材料梯度自愈合性能需求及其调控方案研究、基于低碳环保的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料研发，以及微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料质量控制及应用研究等研究任务；

(3) 完成研究报告、专利、论文等知识产权；

(4) 配合并助推研究成果转化应用。

4. 项目主要负责人情况

闫亚鹏，陕西洛南人，正高级工程师，长安大学道路与铁道工程专业工学硕士，在读同济大学交通运输专业中组部国家专项博士，现

任中交一公院公路绿色智能养护技术研发中心副总工程师，兼任长安大学、北京建筑大学、西安财经大学校外硕士研究生导师，陕西省科技发展计划项目评审专家、陕西省综合评标评审专家库专家、陕西省政府采购评审专家、西安市科技专家、广东省基础与应用基础研究基金项目评审专家。

长期从事道路建养新材料、新技术、公路管养模式体系的研究及应用，负责或参与了国家重点研发计划等国家级和省部级科研项目 20 余项；参编行业标准 3 项、地方及团体标准 12 项；申请企业级工法 2 项；先后获得省部级科学技术一等奖 1 项、科技进步二等奖 4 项，科技进步三等奖 3 项，授权国家专利及软件著作权近 20 项，在国内外核心期刊发表论文 20 余篇。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

1. 依托工程（工作）概况

青银高速靖边至王圈梁段是国道主干线（G035）青岛～银川陕西境内的重要一段，是连接银川、太原、青岛等大中城市的重要路线，是陕西省“十五”公路建设重点工程之一。也是其公路骨架的重要组成部分，是连接陕北能源化工基地与关中经济带的重要通道，道路建成通车以来，充分显示出了其在交通运输行业中的重要地位与作用，为区域经济的快速发展提供了强有力的基础保障，成为区域社会经济发展的“黄金通道”。极大促进沿线区域资源开发和引资开放，对于推进西部大开发战略的实施起着十分重要的作用。

青银高速靖王段起自靖边县新农村乡上彭湾，经靖边、东坑、梁镇、安边、定边，止于陕宁交界王圈梁，与已建成的宁夏古王高速公路相接，起讫桩号 K1241+245～K1373+533，路线全长 132.288 公里。计算行车速度 100 公里/小时，路基宽度 26 米，双向四车道，全立交，全封闭控制出入，全线于 2003 年 3 月开工，2005 年 10 月建成通车。

本项目依托青银高速靖边至王圈梁段作为试点工程，该路段作为区域社会经济发展“黄金通道”的地位显著，交通荷载繁重，具有典型的长期服役与养护需求。在此具有代表性与战略重要性的工程平台上，开展微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量影响关键因素及针对性施工质量控制技术的应用工作。通过现场调查、数据采集与验证分析，为沥青混凝土梯度自愈合材料及其智能化养护技术示范提供示范案例，提升研究成果的工程适用性与可靠性。

2. 投资来源

项目总经费:	80 万元
交通运输厅补助:	19.96 万元
承担单位自筹:	60.04 万元
工程配套研究经费:	/ 万元

3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目研究期限为 2026 年 03 月至 2028 年 03 月, 共计 24 个月。
为确保项目有序推进, 特制定如下详细的工作计划:

(1) 2026.03.01~2026.06.01: 采集沥青路面气候环境、交通荷载及病害状态等数据, 建立数据量化表征指标及其相关性评价模型, 研究多因素耦合作用下沥青混凝土路面服役特征演变规律;

(2) 2026.06.01~2026.11.01: 多尺度分析沥青混凝土梯度自愈合过程, 提出沥青混凝土路面梯度自愈合行为多尺度表征方法与效果综合评价体系;

(3) 2026.11.01~2027.03.01: 解析沥青混凝土材料梯度自愈合基因及其影响因素与优化需求, 提出自愈合性能靶向调控方案;

(4) 2027.03.01~2027.08.01: 优选不同极性和介电损耗角的添加剂材料, 研发满足自愈合性能需求的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料;

(5) 2027.08.01~2027.12.01: 明确微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量影响关键因素, 提出针对性施工质量控制技术, 并在实体工程中验证优化;

(6) 2027.12.01~2028.03.01: 撰写研究报告, 修改完善并准备结题验收。

4. 组织管理形式

本项目由中交第一公路勘察设计研究院有限公司独立承担, 公路绿色智能养护技术研发中心作为核心实施主体, 全面负责项目立项申报、工作大纲编制、技术调研、科研攻关、成果编制及组织评审等具体工作。实行项目负责人负责制, 由项目负责人总体把控研究进度与质量, 针对沥青混凝土路面服役特征及梯度自愈合行为分析、沥青混凝土材料梯度自愈合性能需求及其调控方案研究、基于低碳环保的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料研发, 以及微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料质量控制及应用研究等四项研究任务, 设置分项负责人, 组建专业研究小组开展工作。

同时, 项目承担单位定期组织公司内外部专家咨询与技术协调会, 各分项按年度计划提交季度进展报告, 研究成果需经专家组评审论证后方可验收。项目经费实行专款专用, 确保项目高质高效按期完成。

六、项目经费估算及资金筹措情况

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.96	合 计	80.00	19.96	60.04
工程配套研究经费	0.0	（一）直接费用	68.2	16.46	51.74
单位自筹	60.04	1.设备费	0	0	0
其他经费	0.0	（1）购置设备费	0	0	0
		（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	50.96	9.96	41.0
		（1）材料费	13.0	3.0	10.0
		（2）测试化验实验加工费=	6.0	1.0	5.0
		（3）燃料动力费	4.0	1.0	3.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	17.5	2.5	15.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	6.5	1.5	5.0
		（6）其他费用	3.96	0.96	3.0
		3.劳务费	17.24	6.5	10.74
		（1）专家咨询费	8.5	3.5	5.0
		（2）聘用人员劳务费	5.0	2.0	3.0
		（3）其他劳务费	3.74	1.0	2.74
		（二）间接费用	11.8	3.5	8.3
		4.管理费	4.8	1.5	3.3
		5.绩效支出	7.0	2.0	5.0

七、项目绩效指标

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	知识产权	1、专利授权数（项）	2
		（1）授权发明专利	1
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	
		3、发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其它	1
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2、获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3、其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	1
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	是/否 ☒
		(2) 中试（样品样机）	是/否 ☒
		(3) 小批量	是/否 ☒
		(4) 规模化生产	是/否 ☒
	人才引育	1、引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2、培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4、是否设立科研助理岗位	是/否 ☒
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标

(1) 构建沥青混凝土路面自愈合行为多尺度表征方法及评价体系;

(2) 研发基于低碳环保的微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料 1 种;

(3) 提出微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料施工质量控制技术 1 项;

(4) 申报国家专利不少于 2 项、发表高水平论文不少于 2 篇(其中 SCI 或 EI 不少于 1 篇)。

2.提交的研究成果及其形式

(1) 报告: 完成《面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用》课题研究报告 1 份;

(2) 专利: 申报国家专利 ≥ 2 项;

(3) 论文: 发表核心期刊论文 ≥ 2 篇, 其中 SCI 或 EI 检索不少于 1 篇。

3.经济、社会、环境效益分析

裂缝是沥青路面局部破损中最常出现的病害类型,若裂缝病害维修养护不及时时将引起对行驶安全严重影响的坑槽等病害,且在车辆冲击荷载的作用下,坑槽破损会加快而连成一片,致使局部路段大面积损坏,严重影响路面的使用寿命和车辆行驶的安全性。根据数据统计分析,因裂缝引发的坑槽病害 80%以上为表面层坑槽,但若维修养

护不及时,会迅速发展成为中上面层坑槽,无形中降低了路面行驶质量及安全性能,也造成了维修工作的增加。在路面养护工作中,路面裂缝及引发的坑槽病害处治不仅影响交通保畅,而且费工费时,特别是该类病害的现有养护技术的处治质量难以得到有效保证。

以沥青路面典型、易发且维修养护困难的裂缝及坑槽病害为例,开展沥青路面自愈合材料寿命周期费用分析,用以论证沥青路面自修复材料的优越性。根据中交第一公路勘察设计研究院有限公司承担的交通运输部企业技术创新项目《沥青路面无损温再生技术研究》(合同编号 2014315490010)的调研分析结论,路面裂缝及其引发的坑槽病害通常会在通车后 5 年左右发生,常规裂缝及坑槽修补材料的使用寿命为 1~2 年左右,即采用常规沥青混合料修补裂缝及坑槽后,通常会在两年左右复发病害,因而在设计寿命周期 15 年内同一位置若不受其他养护行为的干扰,同一位置裂缝或坑槽病害采用常规修补材料,按照使用寿命 2 年考虑,则寿命周期内需维修五次。而采用微波敏感型沥青混凝土梯度自愈合材料修补裂缝或坑槽病害,可实现病害部位与周边旧沥青路面的良好融合,使用寿命通常在 3~5 年以上,早期病害通常会在五年左右复发病害,因而在设计寿命周期 15 年内同一位置若不受其他养护行为的干扰,同一位置路面早期病害按照使用寿命 4 年考虑,则寿命周期内需维修三次。大幅降低了病害养护的频率和成本,不仅减少了后期养护施工成本的投入,还减少了道路封道施工的频率,较常规养护手段减少对交通的影响。

因此,该项目技术应用具有良好的经济效益和社会效益。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

依托工程和工程配套经费已落实。



单位负责人：（签字）



年 月 日

面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度 自愈合材料研发与应用 大纲评审意见

2026年3月10日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用”（项目编号：25-43K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标基本明确，技术路线可行。

二、项目研究人员组成合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，经费预算符合规定，具备开展研究工作的条件。

三、预期成果完全覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架高度契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：1.进一步明确梯度自愈合技术的应用场景；
2.进一步细化自愈合表征指标和检测方法。

主任委员：

2026年3月10日

专家审查意见表

项目名称	面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用				
专家姓名	弥海晨	职务/职称	正高工	专 业	道路工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	

评 审 意 见

项目针对沥青路面梯度自愈合养护技术、机理和材料等关键技术研究,具有创新性和实用性

通过.

- 1.进一步明确研发技术应用方式
- 2.沥青路面梯度自愈合技术中"梯度"表征和验证
- 3.增加应用研发成果在"规范化"应用指标

评审专家(签字): 弥海晨

2026年3月10日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

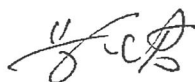
专家审查意见表

项目名称	面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用				
专家姓名	景宏君	职务/职称	教授	专 业	道路工程
专家单位	西安科技大学			联系电话	13689101111

评 审 意 见

沥青路面自愈合材料研究目前被重视。本研究基于研究现状，开展相关研究，实属必要。同意研究大纲评审。建议如下：

1. “拟解决的关键问题”与“主要研究内容”匹配对应。
2. 技术路线图正确画法，建议修改！
3. “面向双碳目标”在研究内容予以体现！
4. 预算经费合理。
5. 论文发表/专利/专著鼓励！

评审专家（签字）： 

2026 年 3 月 10 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用				
专家姓名	王振军	职务/职称	教授	专 业	道路工程
专家单位	长安大学			联系电话	

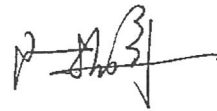
评 审 意 见

本项目对于节能减排, 开发沥青路面自愈合材料具有重要意义, 具有较好的工程应用前景。同意通过该项目的评审。

建议:

1. 自愈合材料的基本组成, 对沥青路面自愈合材料的影响, 需进一步补充;
2. 吸收沥青路面自愈合的评价指标;
3. 补充“双碳”的评价指标。

评审专家(签字):



2026年 3月 10日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用				
专家姓名	吴传海	职务/职称	总工/教高	专 业	道路工程
专家单位	广东华路交通科技有限公司			联系电话	13822141956

评 审 意 见

一、本项目通过机理研究-材料创新-工艺开发-工程验证的全链条研发，以攻克沥青混凝土路面梯度自愈合的核心技术难题，形成一套技术先进、经济合理、环境友好的完整解决方案，项目研究工作极为必要，大纲编写认真严谨，具备一定的可实施性。

二、路面裂缝病害种类繁多、形式各异，成因也各不相同，建议针对不同类型裂缝的愈合机理和发展规律分类进行研究。

三、梯度自愈合材料的开发是本项目研究的难点，如何设计梯度自愈合材料，以及怎么验证梯度自愈合效果需要重点考虑。

四、课题考核技术指标提出自愈合材料在自愈合后路面的高温、低温、水稳定等路用性能恢复至原有性能 80%以上，但如何去定量评价需要考虑。

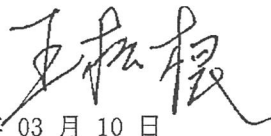
评审专家（签字）：



2026 年 2 月 10 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表（25-43K）

项目名称	面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专 业	公路工程
专家单位	原山东省交通厅公路局			联系电话	13488700091
评 审 意 见 本项目通过机理研究-材料创新-工艺开发-工程验证的全链条研发，攻克沥青混凝土路面梯度自愈合的核心技术难题，形成一套技术先进、经济合理、环境友好的沥青路面裂缝早期养护的完整解决方案。 提出的沥青路面裂缝梯度自愈合和微波自愈合技术具有一定的创新性。提交的研究大纲，研究内容全面、技术路线和实施方案基本可行，项目承担单位及研究团队人员组成合理，基础工作扎实，依托工程和研究经费已落实，具备开展项目研究的各项条件。 同意该项目研究大纲通过评审。 建议： 1. 进一步阐述沥青混凝土路面梯度自愈合的概念和应用场景，是指对既有路面裂缝的养护，还是指新铺路面材料有自愈合的功能？自愈合是指不挖除、不扰动，只通过清缝后灌入微波敏感性材料，采用微波加热技术实现裂缝的自愈合养护措施。 2. 该种技术应有其适用范围，针对沥青路面的早期裂缝是否更有效。 3. 养护后的质量检查应增加取芯检测和质量标准的要求。 评审专家（签字）： 2026年 03 月 10 日 （本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）					

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	弥海晨	西安公路研究院有限公司	公路工程/ 道路材料	道路工程	正高工	弥海晨
2	委员	王振军	长安大学	道路工程	道路工程 材料	教授	王振军
3	委员	景宏君	西安科技大学	道路工程	道路工程 材料	教授	景宏君
4	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	道路工程	正高工	王松根
5	委员	吴传海	广东华路交通科技有限公司	道路工程	道路工程	正高工/总工	吴传海

评审会参会人员签到表

姓 名	职称/职务	工作单位	联系电话
张波	正高	西安公路学院	13991885657
李强	教授	西安科技大学	13689101111
叶明	教授	中交	1308751538
张颖	正高	省公路局	15388602751
乔娟	正高	省公路局	13991366181
王晶晶	正高	省公路局	13609198517
雷宇	正高	中交一公院	13991953523
闫少鹏	正高	中交一公院	18991159930
郑新前	工程师	中交一公院	18372048287

2016年3月10日

专家意见处理表

项目名称：面向双碳目标的沥青混凝土路面梯度自愈合材料研发与应用（项目编号：25-43K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	弥海晨	项目针对沥青路面梯度自愈合养护技术，进行机理和材料等关键技术研究，具有创新性和实用性。 建议： 1、进一步明确研发技术应用方式。 2、沥青路面梯度自愈合技术中“梯度”表征和验证。 3、增加项目研发成果的“规模化”应用指标。	1、按照专家意见执行，在实施方案中明确研发技术应用方式。 2、按照专家意见执行，明确“梯度”表征指标；补充“梯度”验证方法。 3、按照专家意见执行，研究成果不仅在依托工程上进行规模化应用推广，后续技术还将推动梯度自愈合材料在全行业养护作业的精准性、效率与环保水平。
2	王振军	本项目基于减碳目标，开展沥青混合料路面梯度自愈合材料与应用研究，具有较好的工程应用价值。同意通过研究大纲的评审。 建议： 1、自愈合材料的基本组成，对沥青混合料性能的影响，需进一步补充。 2、细化沥青路面自愈合的评价指标。 3、补充“双碳”的评价指标。	1、按照专家意见执行，进一步补充材料基本组成内容，明确技术指标及掺配比例并形成配方表；补充材料基础组成和掺配比例，明确核心组分及对路用性能的基本要求。 2、按照专家意见执行，构建自愈合评价指标，明确各指标检测方法。 3、按照专家意见执行，在主要技术经济指标中增加“双碳”评价指标。
3	景宏君	沥青路面自愈合材料研究目前被重视。本研究基于研究现状，开展相应研究，立项必要，同意研究大纲评审。 建议如下： 1、“拟解决的关键问题”与“主要内容”应匹配对应； 2、注意技术路线图的正确画法，建议修改。 3、面向双碳目标的相应内容应明确。 4、落实自筹经费。 5、拟提交成果形式请斟酌。	1、按照专家意见执行，梳理拟解决的关键问题，优化主要内容研究内容，使拟解决的关键问题与主要研究内容匹配对应。 2、按照专家意见执行，重新绘制技术路线图。 3、按照专家意见执行，将面向双碳目标的相应内容体现在主要研究内容中。 4、按照专家意见执行，已核查并确保自筹经费落实到位。 5、按照专家意见执行，已确认提交成果形式及其形式。

4	王松根	本项目通过机理研究-材料创新-工艺开发-工程验证的全链条研发，攻克沥青混凝土路面梯度自愈合的核心技术难题，形成一套技术先进、经济合理、环境友好的沥青路面裂缝早期养护的完整解决方案。 提出的沥青路面裂缝梯度自愈合和微波自愈合技术具有一定创新性。提交的研究大纲，研究内容全面、技术路线和实施方案基本可行，项目承担单位及研究团队人员组成合理，基础工作扎实，依托工程和研究经费已落实，具备开展项目研究的各项条件。 同意该项目研究大纲通过评审。 建议： 1、进一步阐述沥青混凝土路面梯度自愈合的概念和应用场景，是指对既有路面裂缝的养护，还是指新铺路面材料有自愈合的功能？自愈合是指不挖掘、不扰动，只通过清缝后灌入微波敏感性材料，采用微波加热技术实现裂缝的自愈合养护措施。 2、该种技术应有其适用范围，针对沥青路面的早期裂缝是否更有效。 3、养护后的质量检查应增加取芯检测和质量标准的要求。	1、按照专家意见执行，明确梯度自愈合定义、核心技术方式，同时界定既有路面养护为核心应用场景、新建路面为拓展应用场景。 2、按照专家意见执行，补充技术适用范围，明确对早期裂缝修复效果最优。 3、按照专家意见执行，补充取芯检测要求和质量标准，明确取样要求和质量判定标准。
5	吴传海	本项目通过机理研究-材料创新-工艺开发-工程验证的全链条研发，以攻克沥青混凝土路面梯度自愈合的核心技术难题，形成一套技术先进、经济合理、环境友好的完整解决方案，项目研究工作极为必要，大纲编写认真严谨，具备一定的可实施性。 建议： 1、路面裂缝病害种类繁多、形式各异，成因也各不相同，建议针对不同类型裂缝的愈合机理和发展规律分类进行研究。 2、梯度自愈合材料的开发是本项目研究的难点，如何设计梯度自愈合材料，以及怎么验证梯度自愈合效果需要重点考虑。 3、课题考核技术指标提出自愈合材料在自愈合后路面的高温、低温、水稳定等路用性能恢复至原有性能80%以上，但如何去定量评价需要考虑。	1、按照专家意见执行，研究过程中充分考虑不同类型裂缝的愈合机理和发展规律。 2、按照专家意见执行，补充梯度自愈合材料设计方法和室内、现场双重验证方法。 3、按照专家意见执行，明确基准值、初始值、检测值的确定方法和计算公式，确保定量评价可落地。

大纲评审委员会专家（签字）： 

项目负责人（签字）： 