

项目合同编号：22-20K

陕西省交通运输厅 2022 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：生物基沥青路面预防性养护材料应用技术研究

承担单位：西安红庆机械厂

项目负责人：张琛



通讯邮编、地址：710077、西安莲湖区西二环 259 号西安航空学院院

传真、电话：029-84261737、029-84257395

起止年限：2022 年 11 月 至 2023 年 12 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：22-20K

陕西省交通运输厅 2022 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：生物基沥青路面预防性养护材料应用技术研究

承担单位：西安红庆机械厂

项目负责人：张琛



通讯邮编、地址：710077、西安莲湖区西二环 259 号西安航空学院附

传真、电话：029-84261737、029-84257395

起止年限：2022 年 11 月 至 2023 年 12 月

陕西省交通运输厅制

填写说明：

1. 此文本要求采用计算机打印，字迹清晰，字间距采用标准距离
2. 合同甲方为陕西省交通运输厅；
3. 按照合同书正文、附件（修改后的可研报告、专家评审意见、专家名单及意见处理表等）顺序双面打印胶装，封面、封底用白色布纹纸张。

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

本项目拟开展生物基道面修复材料组分基因调控、界面协同优化及性能演化规律研究，提出一种与既有结构与服役环境匹配的道面修复方案。

(1) 生物基原料综合比选与分子尺度下沥青再生修复机理

选择不同的生物料源（农作物秸秆、猪粪粪便、废弃食用油、木材、蓖麻油等），通过催化提纯与化学合成方法，获取生物基树脂及生物基重油等原料。研究裂解温度、合成工序及外加剂属性对生物基材料化学组分的影响规律，基于微观结构与物化特征，对比优选出酰胺基团、极性芳香分、脂肪烃等极性轻质成分含量高的生物基原料。从分子尺度出发，优化多源生物基原料的分子模型，采用相对浓度法、径向分布函数法及微观形貌法评价生物基材料对依托工程路面老化沥青的修复机制。

(2) 生物基修复材料组分调控与配方优化

采用优选的生物基原材、改性乳化沥青、细骨料、外加剂等制备生物基道面修复材料。基于分子动力学及热力学理论，采用 Flory-Huggins 模型，表征生物基原料与基质沥青间的相容性行为，结合关联宏观性能与微观形貌构建生物基修复材料-依托工程路面稳定性评价体系。采用自研发砂浆工作性与路用性能综合评价装置，提出面向多目标需求的生物基修复材料性能平衡设计准则，建立统一的基因筛选、编辑和虚拟设计方法，实现目标导向的生物基修复

材料组分定向调控。

(3) 基于结构协同的生物基修复材料多尺度界面损伤行为与修复方案

将生物基修复材料应用于不同设计结构及服役状态的既有道面，研究生物基原料类型、涂覆工艺、涂层结构及细骨料含量等因素对界面再生效果及粘结性能的影响规律。基于 X-ray 工业 CT 无损检测系统、AIMS 集料图像测量系统、改进的 UTM 斜剪试验等手段，研究依托工程路面结构与生物基修复材料界面微观形貌、粗糙度与微脱粘特性，探明修复前后新旧界面融合机制与损伤行为，建立微观形貌与宏观粘结性能之间的跨尺度联系，提出针对依托工程材料、结构特征及服役环境的生物基材料界面修复方案。

(4) 生物基修复材料依托工程适配性研究

关联室内环境模拟条件与气候分区和依托工程交通荷载情况，改进耐久性试验平台，探讨细集料选择、最佳粒度、最佳掺配量和最佳厚度对生物基修复材料的性能影响特点，构建依托工程中生物基含砂雾封层、微表处的抗滑及长期性能衰变模型。最终提出针对依托工程材料、结构特征及服役环境的生物基材料界面修复方案，并跟踪进行应用场合分析、路用性能、应用效果评价。

2. 技术关键

(1) 生物基原料综合比选与分子尺度下沥青再生修复机理

选择不同的生物料源，基于微观结构与物化特征，对比优选生物基原料；从分子尺度出发，优化多源生物基原料的分子模型，评

价生物基材料对老化沥青的修复机制。

(2) 基于基因编辑的生物基修复材料组分调控与配方优化

结合关联宏观性能与微观形貌构建生物基修复材料稳定性评价体系；采用自研发砂浆工作性与路用性能综合评价装置，实现目标导向的生物基修复材料组分定向调控。

(3) 基于结构协同的生物基修复材料多尺度界面损伤行为及修复方案

研究依托工程的材料与结构特征与生物基修复材料界面微观形貌、粗糙度与微脱粘特性，建立微观形貌与宏观粘结性能之间的跨尺度联系，提出针对依托工程材料、结构特征及服役环境的生物基材料界面修复方法。

3. 依托工程（依托工作）

项目依托工程 345 国道新建至宁陕公路改建工程，是国家公路网规划(2013-2030)启东至那曲的重要组成部分，起于宁陕县镇安界新建村与 G345 镇安段项目相接，随后沿旧路改扩建，经长坪村、太山庙镇后翻越石沟梁，经青龙村后在上坝河国家森林公园门楼处接回旧路，随后经贾营村、龙泉村、旱坝村、关一村后进入宁陕县城，终点止于宁陕县城与 G210 国道相接，线路全长 51.028 公里，其中二级路段 36.215 公里，三级路段 14.813 公里。拟结合工程进度计划开展项目研究工作，完成配套 100 米的试验段。

二、考核指标

1. 预期目标

- (1) 推荐符合规范要求的生物基原料；
- (2) 揭示沥青再生修复机理；
- (3) 提出生物基修复材料性能平衡设计准则；
- (4) 提出一种与既有结构和服役环境匹配的道面修复方案。

2. 主要技术经济指标

在路面结构设计时，通常将路面从修建到进行处治的时间称为一个性能周期。根据我国沥青路面大中修经验，常用的半刚性基层沥青路面的性能周期一般为 8 年。采用本项目研究成果，假定大中修可有效延缓 2 年，即性能周期延长至 10 年。

以 40 年为分析周期，传统路面需要大中修 4 次，而采用本成果的路面仅需 3 次。参考文献可知，半刚性基层沥青路面结构首次大中修费用约为 550 元/m²，后续每次大中修成本上浮 5%。因此针对 7 米宽，1 公里长的沥青路面，40 年周期内传统方案与本项目方案的成本对比如下：

表 1 40 年周期内传统方案与本项目方案的成本对比（单位：万元）

大修频次	1	2	3	4
传统方案	385	400.4	416.4	433.1
生物基修复	385	400.4	416.4	-

由表 1 可知，生物基修复 方案下，路面运营 40 年期间可以节省一次大修成本，即节约成本 433.1 万元，年均节约超 10 万元。

3. 经济和社会效益

(1) 经济效应:

- ①以路用性能为前提, 选择生物基油掺量为 10%-15%;
- ②生物沥青的生产成本可以降低 20%以上;
- ③生物沥青混合料价格便宜约 7%-10% ;
- ④能降低拌和温度约 10℃, 预计同等条件下, 可降低工程建设成本 15%-20%。

(2) 社会效应:

- ①生物基材料属与可再生资源, 使用其代替石油沥青;
- ②可降低沥青等不可再生资源的消耗与需求量;
- ③生物基资源高温裂解后用于道路工程建设, 实现工业废料的回收利用, 节能减排, 推动路面材料绿色化, 符合循环经济和环保的发展趋势。

4. 成果提供形式

- (1) 研究报告 1 份;
- (2) 国内核心级别以上论文 1 篇并标注项目编号;
- (3) 软件著作权或专利 1 项;
- (4) 生物基修复材料 1 种;
- (5) 试验路段不少于 1 公里。

5. 其他考核指标

- (1) 阐明分子尺度下生物基材料对老化沥青的再生修复机理;
- (2) 提出生物基道面修复材料界面微观形貌与损伤行为的评价

指标;

(3) 开展的媒体宣传报道不少于 3 次;

(4) 技术交流不少于 1 次。

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（每栏限 125 字）
2022	10 月-12 月	对生物基原材料展开系统调研，完成生物基原材料的化学成分与微观结构的综合比选， 形成阶段性总结报告。
2023	01 月-03 月	优选确定 3 种富含酰胺基团、极性芳香分等轻质组分的原料；提出分子尺度下生物基材料对老化沥青的再生修复机理， 形成阶段性总结报告。
	04 月-06 月	完成生物基原料与沥青间相容性行为及稳定性评价研究，形成组分调控推荐方案；采用自研发装备提出生物基道面修复材料的性能平衡设计准则， 形成阶段性总结报告。
	07 月-09 月	完成生物基道面修复材料界面微观形貌与损伤行为评价，优化基于 UTM 的剪切试验方法，进一步建立界面微观形貌与宏观粘结性能的跨尺度关联， 并形成阶段性总结报告。
	10 月-12 月	完成环境荷载时序耦合作用下生物基道面修复材料的界面粘结状态、衰变规律研究，提出针对依托工程材料、结构特征及服役环境的生物基材料界面修复方法， 并形成完整研究报告。

四、项目经费

项目总经费:	24.5	万元
交通运输厅补助:	24.5	万元
承担单位自筹:	0.0	万元
工程配套研究经费:	0.0	万元
其他经费:	0.0	万元

(注:本合同只约定省交通运输厅补助经费,其他经费由相关单位自行确定。)

经费支出预算表

科 目	总经费 (单位: 万元)	厅补经费 (单位: 万元)
(一) 直接费用	23.0	23.0
1.设备费	0.0	0.0
(1) 购置设备费	0.0	0.0
(2) 设备改造与租赁费	0.0	0.0
2.业务费	21.8	21.8
(1) 材料费	5.6	5.6
(2) 测试化验实验加工费	12.2	12.2
(3) 燃料动力费	0.0	0.0
(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费	1.2	1.2
(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事费	2.4	2.4
(6) 其他费用	0.4	0.4
3.劳务费	1.2	1.2
(1) 专家咨询费	1.2	1.2
(2) 聘用人员劳务费	0.0	0.0
(3) 其他劳务费	0.0	0.0
(二) 间接费用	1.5	1.5
1.管理费	1.5	1.5
2.绩效支出	0.0	0.0
合 计	24.5	24.5

五、承担单位或研究人员分工

课题组由 11 位主要成员组成，其中高级职称 3 人，中级职称 4 人，博士 6 人。课题组长期致力于沥青路面性能研究、路面再生、新材料研发研究，拥有道路工程理论研究与实体工程建设、道路材料制备、多源信息数据处理等多方面、多学科领域背景，具有坚实的工作基础和较为丰富的研究经验，对该领域当前国际上的研究前沿及研究动态有较好的认知和把握，具备开展本项目的条件和能力，主要研究人员分工如下。

- (1) 张 琛：撰写方案、主持研究、分配研究人员的研究任务
- (2) 张正伟：主研人员，负责生物基原材料的化学组分与微观结构研究
- (3) 燕 姣：主研人员，生物基材料与沥青的相容性及稳定性研究
- (4) 鹿新平：主研人员，室内试验
- (5) 刘美红：主研人员，黏附性试验
- (6) 屈 鑫：实验结果的宏观与微观多尺度分析
- (7) 肖 珂：协助室内外试验
- (8) 马子业：协助室内外试验
- (9) 牛高峰：技术指导
- (10) 杨亚萍：对研究过程实施全面管理，参与课题研究工作
- (11) 曹国震：提供人力、物力保障，参与研究工作，随时关注课题研究

六、项目参加人员表

项目第一承担单位：西安红庆机械厂
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	项目中担任具体工作
1	张琛	1986.11	西安红庆机械厂	教授	道路与铁道工程	项目负责人
主要研究人员						
2	张正伟	1986.07	西安航空学院	讲师	道路与铁道工程	原材料调研、比选
3	燕姣	1990.01	西安航空学院	副教授	交通运输规划与管理	材料稳定性研究
4	鹿新平	1984.10	陕西路桥集团有限公司	项目经理	道路工程	室内试验
5	刘美红	1992.12	西安红庆机械厂	工程师	道路与铁道工程	室内试验
6	屈鑫	1987.06	长安大学	讲师	道路与铁道工程	多尺度分析
7	肖珂	1987.01	长安大学	博士生	道路与铁道工程	协助室内外试验
8	马子业	1995.10	长安大学	博士生	道路与铁道工程	协助室内外试验
9	牛高峰	1966.04	西安红庆机械厂	工程师	道路与铁道工程	技术指导
10	杨亚萍	1972.06	西安航空学院	教授	道路工程	技术指导
11	曹国震	1980.09	西安航空学院	副教授	道路工程	材料、设备统筹

七、信息表

项目合同编号		22-20K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		生物基沥青路面预防性养护材料应用技术研究							
项目实施所在地		陕西省		起止年限 2022年1月至 2023 年 12 月					
总 经 费		24.5		厅 拨		24.5			
第一承担单位	单位名称	西安红庆机械厂							
	所在地	陕西省西安市莲湖区						代码	
	通讯地址	西安莲湖区西二环 259 号西安航空学院院内						邮编	710077
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其它						代码	3
参与单位	序号	单 位 名 称							
	1	西安红庆机械厂							
	2								
	3								
项目负责人	姓 名	张琛		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1986	
	学 历	(1) 1.研究生 2.大学 3.大专 4.中专 5.其它							
	职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其它							
	联系电话	13636709481		电子邮箱		865916600@qq.com			
项目联系人	姓名	张正伟		性别		男			
	联系电话	13227768665		电子邮箱		675662248@qq.com			
项目组人数	11	高级	3	中级	5	初级	3	其它	
主要研究内容 (100 字以内)	本项目拟开展生物基道面修复材料组分基因调控、界面协同优化及性能演化规律研究,提出一种与既有结构与服役环境匹配的道面修复方案。								
成果属性	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	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							

八、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. 乙方必须分年度向甲方提出上年年度计划执行情况报告。

2. 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。未经接到正式批准以前，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。

3. 乙方因任何主观或客观原因（如：与可行性研究内容有出入，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。

4. 乙方的厅补助经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

5. 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。

6. 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。

7. 合同附件中关于项目研究的有关事项，是本合同的有效条款。

8. 合同正本一式拾份,甲方单位伍份,承担单位伍份
9. 本合同经双方签章后生效,规定内容执行完毕后自然失效。

九、附件

- 1.经过专家评审的项目可行性研究报告
- 2.评审委员会专家意见、意见处理表及专家名单
- 3.陕西交通科技项目科研诚信承诺书

十、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）



2022年 11月 15日

联系人：（签字）

（公章）

科技合同专用章

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）



项目负责人：（签字）

张保

电 话：17702903781



财务负责人：（签字）

孟芳玲

账 户 名：西安红庆机械厂

开户银行：中国工商银行西安南大街支行

帐 号：3700020109003502554

项目编号: 22-20K

2022 年度陕西省交通运输厅科研项目 可行性研究报告

项目名称: 生物基沥青路面预防性养护材料应用技
研究

申请单位: 西安红庆机械厂 (盖章)

联系人: 张正伟

电 话: 13227768665

陕西省交通运输厅制

2022 年 10 月

填写说明

格式要求：目录页码齐全，双面打印，胶装不另加封皮。

可研报告可参考网评专家意见及建议，按照**研究大纲深度**编写。

应用技术类应本着有限目标、有限规模、重点突出、适应市场、重在应用的原则，不求全求大、面面俱到。综合考虑研究期限、财力等实际情况，合理确定研究内容。软科学研究项目可研报告应由相关业务单位或部门牵头完成，内容要与业务工作紧密结合。

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目背景

据交通运输部统计数据，截止 2020 年底，我国公路养护总里程已超过 500 万公里，占公路总里程的 98%以上，结合公路建设规划及养护里程增长态势，未来道面的养护修复任务非常繁重。

近年来，随着道路的原材料品质提升、结构设计优化及超载车辆严格管控，沥青路面的早期病害形式逐渐从坑槽、车辙、推移等材料结构损伤转变为微裂缝、表面磨耗、抗滑衰减等表面功能损伤。沥青路表存在微裂缝，水分更易侵入内部结构，导致混合料模量衰减、结构稳定性降低；集料磨光会影响表面纹理的粗糙程度，导致路面抗滑性能降低，进而威胁行车安全。采取预防性养护措施对沥青路面早期病害进行针对性的修复，如封堵表面微裂缝、固结松散集料等，是延长道路服役寿命的重要途径。

目前广泛应用的预防性养护措施主要包括：雾封层、微表处、稀浆封层、碎石封层和薄层罩面等。其中，雾封层可以填封沥青路面微裂缝和表面空隙，起到防水和抑制松散的作用，避免早期病害向深层位发展（如图 1 所示）。对比其他预养方式，雾封层的施工工艺更加简单，开放交通更加快速，且在费用投入和环保效应方面具有较大的优势。然而，传统雾封层在应用过程中存在路表摩擦系数易降低、表面材料易“脱皮”等问题，无法满足沥青路面长期封水及抗滑要求，难以达到预期的养护目的。

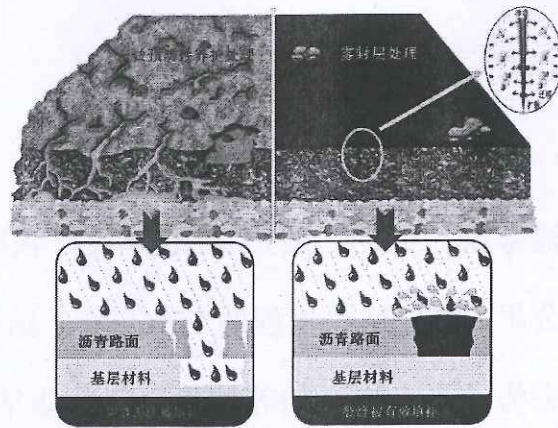


图 1 雾封层修复材料应用效果示意图

为增强雾封层与原路面的嵌固效果，改善路表的再生能力与抗滑特性，研究人员提出一种基于颗粒-浆体共混理念的预防性养护技术——生物基道面修复材料（含砂雾封层），其是由乳化沥青、生物基原料、填料、水及细骨料等主要成分构成。再生型含砂雾封层既保留了传统雾封材料施工便利、开放交通迅速、封水效果好等优点，还具备如下技术优势：①细骨料可随雾封胶浆沿路表微裂缝同步下渗，与旧路面产生嵌固效应，再造路表抗滑纹理形貌；②含砂雾封层中的生物基轻质组分可通过渗透补充、成分激活等方式对路表部分老化沥青进行性能恢复。然而，生物基道面修复材料在配方设计与运营服役阶段仍存在以下技术难题，影响了其进一步推广应用：

首先，在材料设计阶段，生物基原料的来源多样，内部组分构成尚不明晰，与乳化沥青共混后存在不相容的隐患，且缺乏化学组分与再生效果、微观结构之间的关联性分析，导致原材的优化选择缺乏依据；此外，细骨料的掺入使得生物基修复材料在长期储存中易出现泌水、离析问题，导致材料品质下降、养护效果减弱，如何平衡生物基修复材料的均质性与流动性是面临的主要问题，目前尚缺乏相应的评

价指标。

其次，在运营服役阶段，生物基修复材料存在与旧路面黏结效果较差的问题，易发生界面损伤、抗滑失效等现象；由于表面细骨料嵌锁不牢，在轮迹带区域易被车轮磨耗带走，导致路面抗滑性能迅速衰减。目前对于生物修复材料与原路面层间粘结特性的研究多局限于间接试验手段，且未综合考虑环境及荷载因素，对于界面浸润效果、强度形成的机理尚不明晰，缺乏多物理场耦合作用下的生物基道面修复材料长期性能研究。

1.2 项目必要性

近年来，随着道路的原材料品质提升、结构设计优化及超载车辆严格管控，沥青路面的早期病害形式逐渐从坑槽、车辙、推移等材料结构损伤转变为微裂缝、表面磨耗、抗滑衰减等表面功能损伤。沥青路表存在微裂缝，水分更易侵入内部结构，导致混合料模量衰减、结构稳定性降低；集料磨光会影响表面纹理的粗糙程度，导致路面抗滑性能降低，进而威胁行车安全。采取预防性养护措施对沥青路面早期病害进行针对性的修复，如封堵表面微裂缝、固结松散集料等，是延长道路服役寿命的重要途径。

本项目基于多源生物基原料的物化特性，制备一种组分基因可控、界面性能优异、适配原路面材料、兼具再生能力的生物基道面修复材料。从分子尺度揭示生物基材料对老化沥青的修复机制，并建立宏-微观性能关联与平衡设计准则；考虑不同设计结构及服役状态的既有道面，揭示修复前后界面融合与损伤行为；提高修复材料与既有

路面状态、气候环境及交通荷载等因素的匹配性，并最终在依托工程中应用。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状与发展趋势

2.2.1 国内外技术现状

(1) 功能性雾封层材料的设计研发现状

在上世纪八十年代，美国开展了路面全寿命周期性能的研究[1]（The Long-Term Pavement Performance，简称 LTPP）。LTPP 旨在研究路面病害产生的原因以及养护对策，其在北美的 2500 条各等级公路均设有观测点，可以不定期收集路面的路况、病害产生情况、当地的交通量、气候状况等[2]。LTPP 的子项目 SPS-3 旨在评价各种预防性养护工艺的实用性，进而确定出高效的养护方法[3]。通过三十多年的观测，LTPP 的研究积累了大量的数据资料，并在网上建立了数据共享系统，可让全世界的道路研究者随时获取监测道路的路况信息。

Peshkin [4]在 2004 年系统地提出了不同预防性养护技术的预期使用寿命：雾封层（1~2 年）；稀浆封层（3~5 年）；碎石封层（4~7 年）；微表处（4~7 年）；薄沥青罩面（7~10 年）。针对不同路面的交通量和所处的气候条件，Labi [5]通过调查印第安纳州的路况，发现路况较差的道路采用预防性养护后其性能会较路况较好的有更显著的提升，但是其性能衰减却明显更快。

在过去的二十多年中，欧美的沥青价格波动较大，高涨的沥青价格使得道路养护部门更加迫切需要以更小的沥青用量来获得更大的养护收益[6]。雾封层材料厚度往往在 1mm-3mm，沥青用量虽小却可以较好地恢复路面部分使用性能，所以雾封层技术在国外被广泛使

用。Hajj[7]于 2010 年调查了美国内华达州 847 条道路的养护状况,并对各种养护方式进行了效益-费用分析,结果显示雾封层的经济性及环保性最佳。

美国联邦公路局(FHWA)于 2001 年开始对境内的雾封层材料进行立项研究,在不同交通量、路表情况和气候状况的路段铺筑了试验路,总结了多种雾封层的功能和适用条件,并依据材料功能将雾封层分为封层型和再生型,选用乳化沥青、改性乳化沥青作为主要基础材料[8-10]。

近年来,国内高校与科研院所集中研发了一批新型环保雾封层材料。韩静、郝培文等人[11]将有机硅防水材料(由硅树脂溶液、渗透剂和增粘剂组成)运用到沥青路面中,有机硅雾封层可使路面渗水系数降到零,防水效果显著。郭利杨、徐世法等人[12]分别以喷涂和水基涂覆两种方式将纳米 TiO_2 施用到沥青混凝土表面,研发了尾气净化型雾封层,且水基涂覆法降解尾气效果较喷涂法提高 3.4%~32.1%。郭腾腾、王朝辉等人[13]提出了两种具有降温 and 空气净化功能的含砂雾封层材料,并开发了保温装置和空气净化试验设备。徐世法 [14] 基于自主研发的用于雾封层的氮掺杂二氧化钛基降解材料,研制了具有聚丙烯酰胺链接枝的纤维素高分子聚合物稳定剂,并提出了稳定性评价方法与指标。目前所开发的各类雾封层材料设计方法多样、环保功能性突出,但针对生物基道面修复材料,存在材料品质划分缺乏依据、作用机理解释不明确等问题,且未合理解决均质性与流动性平衡设计这一关键问题。

(2) 封层材料黏附效果评价方法

封层类材料作为一种路面养护材料,可以有效地恢复路面的耐磨抗滑、封堵防渗的特性,黏结松散集料,减少路面水损坏,改善道路表面状况,延长道路服役寿命。常见的封层材料包括碎石封层(Chip Seal)、含砂雾封层(Seal Fog)、微表处(Micro-Surfacing)、纤维封层(Fiber Seal)及开普封层(Cape)等,封层与集料、路面之间的黏附效果是影响其发挥性能的重要因素。

对于碎石封层,覃潇、申爱琴等人[15]通过层间拉拔试验(Pull-Off Test)和剪切试验(Shear Test),研究了改性乳化沥青类型、碎石岩性及粒径等因素对纤维沥青碎石封层层间黏结性能的影响,并以纤维-沥青界面及封层断裂面处的扫描电镜分析(SEM),分析封层材料与沥青面层层间黏结特性。尤占平等人[16,17]则通过自主研发的剪切黏结仪(Michigan Tech's Shear Bond Test),测试了碎石封层与沥青路面之间的剪切黏结强度,并讨论了温度和冻融循环对剪切黏结强度的影响。Alvarez 等人[18]通过平板剥离试验(Plate-Stripping Test)和水煮法(Boiling-Water Test)分析封层材料与多种类型集料之间的黏附效果。Jaejun Lee、Richard Y. Kim[19]利用 Vialit 试验,研究了聚合物改性乳化沥青(CRS-2L)在碎石封层中应用时的碎石震落率,分析其对集料的黏附性影响。

对于雾封层,Prapaitrakul 等人[20]对将雾封层材料应用在机场道面,并分析评估了雾封层长期服役状态下的层间黏结性能。Jeong Hyuk Im 等人[21,22]对雾封层材料室内及现场评价手段进行研究。采

用气动黏附试验对材料的黏附性能进行表征。郑东、钱振东等人[23]拓展了雾封层材料的应用,以碎石损失率评价了雾封层在钢桥面环氧沥青铺装层(EAP)中的应用。

针对其他类型的封层材料,季节、徐世法等人[24]为评价水性环氧树脂改性乳化沥青用以微表处的性能,通过 1h 湿轮磨耗试验

(WTAT)和负荷轮黏附砂试验(LWT)测定不同油石比下用以微表处的磨耗值和黏附砂量。类似的,刘梦梅、韩森等人[25]也采用过 1h 湿轮磨耗试验来研究自开发水性环氧树脂改性乳化沥青的微表处耐磨耗特性。蔺宝垚、王选仓[26]针对玻璃纤维碎石封层的层间黏结特性进行了试验,设计了斜面剪切黏附试验和水平拉力试验,以此表征封层材料表面与沥青混合料的层间黏附性能。欧冬、凌天清[27]则以表面能理论(Surface Energy)为基础,对纤维、沥青及水泥混凝土进行接触角(Contact Angle)测量试验,通过计算黏附功评价和优选了材料,并辅以有限元分析,建立了纤维织物有限元模拟,分析了纤维织物整体力学性能和纤维-沥青界面的受力特点。王天宇、姚爱玲[28]采用改装湿轮磨耗仪,模拟抗冲刷效果,研究不同组合形式的橡胶沥青 Cape 封层的抗脱落性。

雾封层的开放交通时间同样是评价层间黏附效果的关键指标。

Jeong Hyuk Im[21]曾以滚球试验和浸渍试验对开放交通的时间效率进行评价,闫忠良、谭忆秋[29]则以手指按压不黏手时间等方法来评价交通开放时间。张翔、汪海年等人[30]则提出了一种基于图像处理的室内评价方法,通过加荷实验获取不同时间阶段的雾封层表干图

像,以各时间阶段的像素占初始阶段像素的百分比,作为评价雾封层材料表干固化时间的方法,并绘制像素比-时间曲线,并以曲线稳定平缓作为雾封层终干且可开放交通的判定依据。

含砂体系的生物基道面修复材料是基于传统雾封层材料的改进和创新,细骨料改变了材料的渗透特性及固化效果,目前对于界面接触行为的研究局限于间接试验手段,对细微观结构表征及界面融合机理的解释不够明晰。

(3) 国内外雾封层养护材料的应用现状

道路开放交通,早期病害出现后,雾封层由于施工工艺简单,维护费用低廉,开放交通迅速等特点,成为沥青路面预防性养护前期代表性处治方式。同时,雾封层可以封闭路面微细裂缝,通过减少水分和空气进入路面可以长久保持集料颗粒稳固,进而延长路面使用寿命[31]。针对雾封层施工后路面摩擦系数降低的问题[32],国内外学者针对雾封层的抗滑性及耐久性提出了一系列评价方法。King Gayle Nathaniel 等人[33]对雾封层及再生剂封层进行研究,以摆式仪和铺砂法评价雾封层施工后的抗滑性能。Tran Nam 等人[34]开展了针对开级配抗滑磨耗层(OGFC)表面撒布雾封层后抗滑性能的进行研究,以国际摩擦指数 (IFI) 来评价抗滑性能。范斌卫、裴建中[35]则以抗滑摆值和构造深度来反映路面的抗滑性能。Nadeem A. Qureshi 等人[36]对再生封层和雾封层材料改善 OGFC 路面耐磨耗性能开展研究,以汉堡车辙仪和肯塔堡飞散试验表征耐磨耗性能。

采用雾封层技术养护旧路面,雾封层材料渗透特性和路面抗滑性

能一直是道路养护从业者普遍关注的问题。张久鹏等人[37]对沥青路面雾封层的渗透性和防滑性进行了室内研究,为了保证材料渗透深度和路面抗滑能力,建议雾封层材料最佳的喷涂量在 $0.2-0.4\text{kg}/\text{m}^2$ 之间。DingXin Cheng 等人[38]通过分析加利福尼亚州 5 年间(2009 年~2013 年)使用雾封层养护沥青路面的情况,认为沥青路面的宏观纹理随着雾封层材料用量增加而减小,在喷洒雾封材料后路面的抗滑性能会降低,但在洒砂处理后,路面的抗滑性能会提升,同时,分析试点项目的研究数据表明,雾封层可以延长间断级配和开级配沥青路面的使用寿命。

雾封层的应用应该充分考虑它的工程定位和功能。速干型雾封层主要针对机场跑道和高架道路等需要快速开放交通的沥青路面[39],这种功能层由再生层和表覆层组成,具有良好的速干效果,且 50A 老化沥青渗透再生化后可达到新沥青水平,应用于上海市南北高架汶水路段和闵行区绿莲路段的沥青路面,具有良好的养护效果。还原剂雾封层具有还原旧路面老化沥青的功能,Kebede[6]采用还原剂雾封层处理印第安纳州南部的十三条不同的道路,发现路面喷洒大豆基还原剂后,路表面抗滑降低最小;聚合物改性还原剂和煤焦油还原剂对粘结剂的还原效果更好。此外,雾封层可以延长路面寿命并推迟大修时间[40],生物改性剂雾封层能够延缓紫外线作用引起的路面沥青老化[41],在沥青路面预防性养护措施的失效概率方面,雾封层和稀浆封层的路用性能明显差于薄层罩面和碎石封层[42]。

为了拓宽雾封层的应用范围,改善雾封层的抗滑性能和耐久性,

含砂雾封层这种养护方案逐渐进入研究人员的视线。李凯、肖鹏等人[43]的研究表明,含砂雾封层耐久性良好的关键因素的控制范围是:用砂量为15%~25%,固含量为50%~60%,洒布量为0.8kg/m²,根据此方案制备的含砂雾封层材料应用在扬州地区G328试验段,养护效果良好。此外,肖庆一等人[44]通过在含砂雾封层中添加光催化材料,发现其具有良好的降解汽车尾气功能。胡迟春等人[45]研究了水性环氧树脂改性沥青乳液(WEB)作为路面预防性维护材料的性能,表明水性环氧树脂能够均匀地分布在沥青基质中,并显著改善抗滑性及耐久性。

含砂雾封层应用于预防性养护领域具有改善层间黏结、增强路表抗滑性能等明显优势,但通过调研国内外应用现状,环境及荷载耦合作用下道面修复材料的抗滑性及耐久性评价、性能衰变规律尚需深入研究,以进一步提升材料品质。

2.1.2 国内外技术发展趋势

纵观国内外关于封层材料的研发设计、性能评价及应用效果的研究现状可知,沥青路面服役初期,雾封层作为预防性养护措施被广泛应用,并取得阶段性成果。但对于各类功能型雾封层材料的研究仍局限于对实际路用性能的探讨,尤其是生物基修复材料,尚未深入到材料内在作用机理及服役性能表征的层面,主要存在以下三点问题:

(1) 不同来源的生物基原料与沥青间相容性及再生效果的关联性探究不够深入,多尺度下生物基修复材料的性能平衡设计缺乏有效依据。

(2) 对于界面接触行为的研究局限于间接试验手段, 考虑生物基修复材料的基础属性, 对细微观结构表征及界面融合机理的解释不够明晰。

(3) 目前的养护封层材料大多处于试验研究阶段, 应用后存在性能衰减速度较快的现象, 缺乏环境及荷载耦合作用下材料的长期性能演化规律研究。

综上所述, 结合生物基材料的自身特征, 本项目拟对其化学作用机理、组分调控准则、界面损伤行为及长期性能表征开展一系列研究, 并将分子动力学、分析化学、高通量计算方法与深度学习算法等学科交叉研究手段应用至道路材料领域, 进一步完善生物基道面修复材料的设计评价指标, 提高材料内在品质、揭示作用机理, 并推荐适用对象、适用条件和适用范围, 为其在道路预养领域的推广应用奠定基础。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

本项目依托特殊地区公路工程教育部重点实验室及道路结构与材料交通行业重点实验室开展工作, 试验室拥有沥青和沥青混合料全套试验系统、道路综合检测车等一批国际上较为先进的试验仪器设备。

项目组成员长期致力于路面检测与病害发展规律研究, 项目组成员具有道路工程、材料学和信息工程多学科领域背景, 具有坚实的工作基础和较为丰富的研究经验, 先后承担过“基于环境特征的温拌香蕉改性沥青混合料的老化激励性能评价研究”“青藏高寒区交峰矮星沥青的材料组成优化及性能评价研究”等项目。在以上前期研究

基础上,对本领域当前国际上的研究前沿及研究动态有较好的认知和把握,具备开展本项目的条件和能力。

2.3 参考文献

- [1] Morian D A, Gibson S D, Epps J A. Maintaining flexible pavements the long term pavement performance experiment SPS-3 5-year data analysis [J]. Cracking, 1998.
- [2] Page T R D. LTPP specific pavement studies (SPS) materials action plan final report[J]. Base Course, 2010.
- [3] Morian D A, Wang G, Frith D, et al. Analysis of completed monitoring data for SPS-3 experiment [C]. Transportation Research Board Meeting, 2011.
- [4] Peshkin D G, Hoerner T E, Zimmerman K A. NCHRP Report 523: Optimal timing of pavement preventive maintenance treatment applications. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, 2004.
- [5] Labi S, Sinha K C. Effectiveness of highway pavement seal coating treatments [J]. Journal of Transportation Engineering, 2004, 130(1): 14-23.
- [6] Kebede A A. Asphalt pavement preservation using rejuvenating fog seals [D]. Purdue University, 2016.
- [7] Hajj E, Loria L, Sebaaly P. Performance evaluation of asphalt pavement preservation activities [J]. Transportation Research Record, 2010, 2150: 36-46.
- [8] Airey G D. Factors affecting the rheology of polymer modified bitumen (PMB) [J]. Polymer Modified Bitumen, 2011: 238-263.
- [9] Liu W. RAP percentage and warm mix additive influence on regenerated asphalt mixture performance [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 251: 436-441.
- [10] Lin J, Hong J, Huang C, et al. Effectiveness of rejuvenator seal materials on performance of asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2014, 55: 63-68.
- [11] 韩静. 沥青路面预防性养护材料的开发及技术性能研究[D]. 导师: 郝培文, 长安大学, 2012.
- [12] 郭利杨, 徐世法, 黄玉颖, 等. 纳米 TiO_2 雾封层对汽车尾气降解效果评价[J]. 北京建筑大学学报, 2017, 33(3): 27-32.
- [13] Guo T, Wang C, Yang X, et al. Development and performance of sand fog seal with cooling and air purification effects [J]. Construction and Building Materials, 2017, 141: 608-618.
- [14] 徐世法, 李思童, 李书飞, 等. 汽车尾气降解材料路用稳定剂开发及性能评价[J]. 中国公路学报, 2019, 32(04): 118-125.
- [15] 覃潇, 申爱琴, 郭寅川, 等. 温度及动水压力工况下纤维沥青碎石封层层间黏结性能 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20(04): 604-610.

- [16] You L, Jin D, You Z, et al. Laboratory shear bond test for chip-seal under varying environmental and material conditions [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2019: 1-9.
- [17] You L, You Z, Dai Q, et al. Investigation of adhesion and interface bond strength for pavements underlying chip-seal: effect of asphalt-aggregate combinations and freeze-thaw cycles on chip-seal [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 203: 322-330.
- [18] Alvarez A E, Espinosa L V, Perea A M, et al. Adhesion quality of chip seals: comparing and correlating the plate-stripping test, boiling-water test, and energy parameters from surface free energy [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(3): 11.
- [19] Lee J, Kim R Y. Evaluation of polymer-modified chip seals at low temperatures [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2014, 15(3): 228-237.
- [20] Prapaitrakul N, Freeman T, Glover C. Fog seal treatment effectiveness analysis of pavement binders using the t-test statistical approach [J]. *Petroleum Science and Technology*, 2010, 28(18): 1895-1905.
- [21] Im J H, Kim Y R. Methods for fog seal field test with polymer-modified emulsions: development and performance evaluation [J]. *Transportation Research Record*, 2013, 2361(1): 88-97.
- [22] Im J H, Kim Y R. Performance evaluation of fog seals on chip seals and verification of fog seal field tests [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2015, 42(11): 150825143826008.
- [23] 郑冬, 钱振东, 王睿, 等. 钢桥面环氧沥青铺装用雾封层加碎石封层的设计与试验评估(英文) [J]. *中南大学学报(英文版)*, 2017, 33(01): 101-105.
- [24] 季节, 刘禄厚, 索智, 等. 水性环氧树脂改性乳化沥青微表处性能[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2017, 37(05): 23-30.
- [25] Liu M, Han S, Wang Z, et al. Performance evaluation of new waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt micro-surfacing [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 214: 93-100.
- [26] 蔺宝垚. 玻璃纤维沥青碎石封层力学性能及其应用研究[D]. 导师: 王选仓, 长安大学, 2019.
- [27] 欧冬. 纤维沥青应力吸收层中纤维与沥青的作用机理研究[D]. 导师: 凌天清, 重庆交通大学, 2014.
- [28] 王天宇. 橡胶沥青 CAPE 封层技术在湿热地区的研究与应用[D]. 导师: 姚爱玲, 长安大学, 2019.
- [29] 闫忠良. 快凝抗滑型雾封层在城市道路中的应用研究[D]. 导师: 谭忆秋, 哈尔滨工业大学, 2016.
- [30] Zhang X, Wang H, Hasan M R M, et al. Traffic open time prediction of fog seal with sand using image processing technology [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209: 9-19.

- [31] Wood T J, et al. Minnesota seal coat handbook 2006 [J]. Equipment, 2006.
- [32] Jahren C, Smith D, Plymesser C. Thin maintenance surface for municipalities. Center for Transportation Research and Education, Iowa State University, 2007.
- [33] King G N, King H. Spray-applied surface seal: fog and rejuvenator seals [C]. Transportation Research Board Meeting (TRB), 2008.
- [34] Tran N, Watson D E, Anwer N. Effect of using fog seals without sanding on surface friction and durability of open-graded friction course [C]. Transportation Research Board Meeting (TRB), 2012.
- [35] 范斌卫. 沥青路面雾封层应用技术研究[D]. 导师: 裴建中, 长安大学, 2012.
- [36] Qureshi N A, Tran N H, Watson D, et al. Effects of rejuvenator seal and fog seal on performance of open-graded friction course pavement [J]. Maejo International Journal of Science and Technology, 2013, 7(02): 189-202.
- [37] Zhang J, Luo P, Xu L, et al. Laboratory study on the permeability and skid resistance of asphalt pavement fog seal layer [C]. 15th COTA International Conference of Transportation Professionals, Proceedings, 2015.
- [38] Cheng D, Lane L, Vacura P. Performance evaluation of fog and rejuvenating seals on gap and open graded surfaces by caltrans [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2015, 8(3): 159-166.
- [39] 陈琪. 速干型雾封再生材料的合成与应用[D]. 导师: 凌昊, 华东理工大学, 2017.
- [40] Islam R M, Arafat S, Wasiuddin N M. Quantification of reduction in hydraulic conductivity and skid resistance caused by fog seal in low-volume roads [J]. Transportation Research Record, 2017, 2657: 99-108.
- [41] Mehdi Z, Shahrzad H, Ruben O, et al. Application of a biomodifier as fog sealants to delay ultraviolet aging of bituminous materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(12).
- [42] Chen X, Dong Q, et al. Bayesian analysis of pavement maintenance failure probability with markov chain monte carlo simulation[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2019, 145(2).
- [43] 李凯. 耐久性含砂雾封层在公路养护工程中的应用研究[D]. 导师: 肖鹏, 扬州大学, 2018.
- [44] Xiao Q, Chen X, et al. Experimental study on NO₂ photocatalytic degradation on sand fog seal with nano TiO₂ [C], International Conference on Energy, Power, Environment and Computer Application, 2019.
- [45] Hu C, Zhao J, Leng Z, et al. Laboratory evaluation of waterborne epoxy bitumen emulsion for pavement preventative maintenance application. Construction and Building Materials, 2019, 197: 220-227.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

本项目拟开展生物基道面修复材料组分基因调控、界面协同优化及性能演化规律研究，提出一种与既有结构与服役环境匹配的道面修复方案。拟解决关键问题如下：

- (1) 生物基原料综合比选与分子尺度下沥青再生修复机理；
- (2) 基于结构协同的生物基修复材料多尺度界面损伤行为与修复方案；
- (3) 如何将室内环境模拟条件与气候分区和依托工程交通荷载情况有效关联；
- (4) 如何改进耐久性试验平台，构建复杂服役环境下生物基修复材料的长期性能衰变模型。

3.2 主要研究内容及实施方案

(1) 生物基原料综合比选与分子尺度下沥青再生修复机理

选择不同的生物料源（农作物秸秆、猪粪粪便、废弃食用油、木材、蓖麻油等），通过催化提纯与化学合成方法，获取生物基树脂及生物基重油等原料。研究裂解温度、合成工序及外加剂属性对生物基材料化学组分的影响规律，基于微观结构与物化特征，对比优选出酰胺基团、极性芳香分、脂肪烃等极性轻质成分含量高的生物基原料。从分子尺度出发，优化多源生物基原料的分子模型，采用相对浓度法、径向分布函数法及微观形貌法评价生物基材料对依托工程路面老化沥青的修复机制。

(2) 生物基修复材料组分调控与配方优化

采用优选生物基原材、改性乳化沥青、细骨料、外加剂等制备生物基道面修复材料。基于分子动力学及热力学理论,采用 Flory-Huggins 模型,表征生物基原料与基质沥青间的相容性行为,结合关联宏观性能与微观形貌构建生物基修复材料-依托工程路面稳定性评价体系。采用自研发砂浆工作性与路用性能综合评价装置,提出面向多目标需求的生物基修复材料性能平衡设计准则,建立统一的基因筛选、编辑和虚拟设计方法,实现目标导向的生物基修复材料组分定向调控。

(3) 基于结构协同的生物基修复材料多尺度界面损伤行为与修复方案

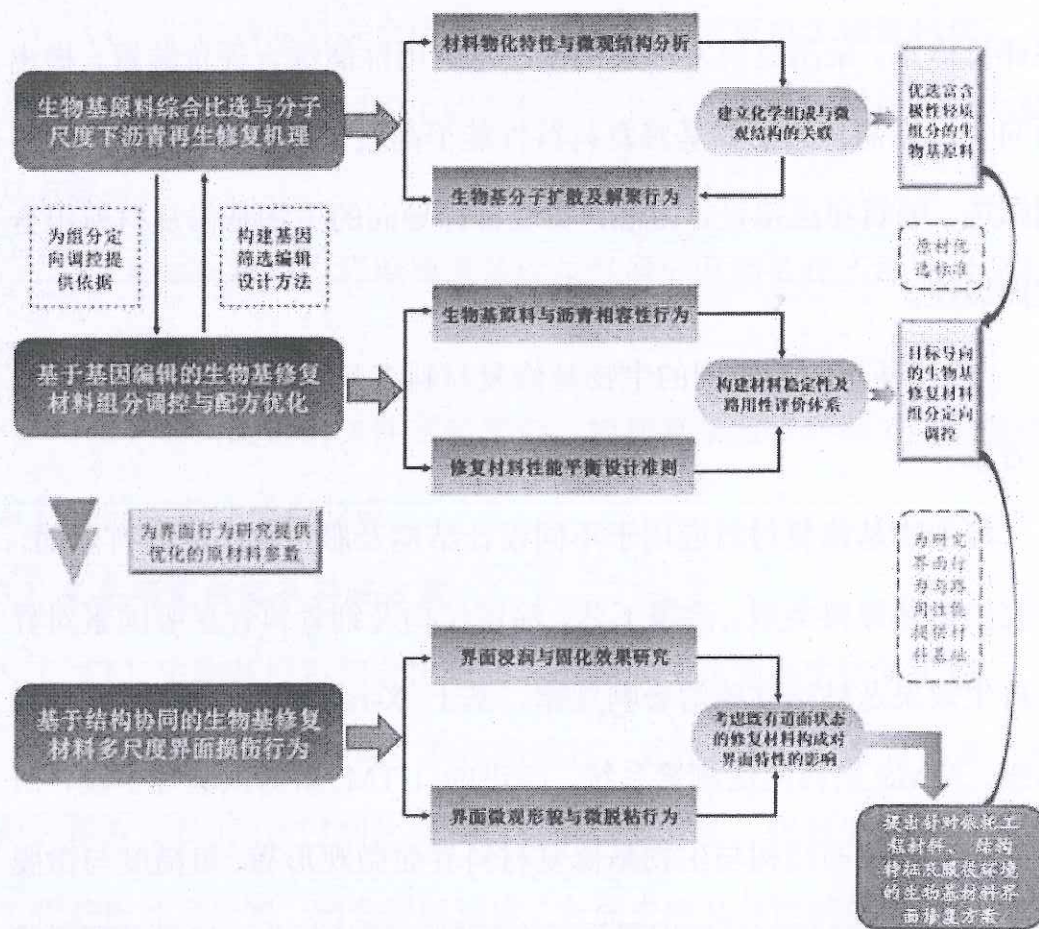
将生物基修复材料应用于不同设计结构及服役状态的既有道面,研究生物基原料类型、涂覆工艺、涂层结构及细骨料含量等因素对界面再生效果及粘结性能的影响规律。基于 X-ray 工业 CT 无损检测系统、AIMS 集料图像测量系统、改进的 UTM 斜剪试验等手段,研究依托工程路面结构与生物基修复材料界面微观形貌、粗糙度与微脱粘特性,探明修复前后新旧界面融合机制与损伤行为,建立微观形貌与宏观粘结性能之间的跨尺度联系,提出针对依托工程材料、结构特征及服役环境的生物基材料界面修复方案。

(4) 生物基修复材料依托工程适配性研究

关联室内环境模拟条件与气候分区和依托工程交通荷载情况,改进耐久性试验平台,探讨细集料选择、最佳粒度、最佳掺配量和最佳

厚度对生物基修复材料的性能影响特点,构建依托工程中生物基含砂雾封层、微表处的抗滑及长期性能衰变模型。最终提出针对依托工程材料、结构特征及服役环境的生物基材料界面修复方案,并跟踪进行应用场合分析、路用性能、应用效果评价。

3.3 技术路线



3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

截止 2020 年底,我国公路养护总里程已超过 500 万公里,占公路总里程的 98%以上,结合公路建设规划及养护里程增长态势,未来道面的养护修复任务非常繁重。

借助本项目的研究成果,将实现科学、高效、节约的养护作业,

抑制道路早期病害的恶化趋势及发育速度，可有效延缓各类基础设施的病害出现，延长其服役寿命，一方面可直接延缓交通基础设施翻新或重建的经济投入；另一方面，可大幅度降低基础设施服役期间的维修与养护费用。降低养护及维修频率也能避免由于养护施工行为造成的交通延误，及行车风险和其他交通成本的增加。所以借助本项目的修复技术，可从直接和间接两方面节约沥青路面运维期间的经济、资源以及人力浪费，达到更经济的全寿命周期成本。

3.5 有关技术经济指标

在路面结构设计时，通常将路面从修建到进行处治的时间称为一个性能周期。根据我国沥青路面大中修经验，常用的半刚性基层沥青路面的性能周期一般为 8 年。采用本项目研究成果，假定大中修可有效延缓 2 年，即性能周期延长至 10 年。

以 40 年为分析周期，传统路面需要大中修 4 次，而采用本成果的路面仅需 3 次。参考文献可知，半刚性基层沥青路面结构首次大中修费用约为 550 元/m²，后续每次大中修成本上浮 5%。因此针对 7 米宽，1 公里长的沥青路面，40 年周期内传统方案与本项目方案的成本对比如下：

表 1 40 年周期内传统方案与本项目方案的成本对比（单位：万元）

大修频次	1	2	3	4
传统方案	385	400.4	416.4	433.1
生物基修复方案	385	400.4	416.4	-

由表 1 可知，生物基修复 方案下，路面运营 40 年期间可以节省一次大修成本，即节约成本 433.1 万元，年均节约超 10 万元。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

西安红庆机械厂（西安航空学院校办工厂）是西安航空学院下设的教学科研生产单位，同时为陕西省科技型中小企业，陕西省“专精特新”中小企业，西安市军民融合企业，国家级高新技术企业，取得了三级保密资格证、装备承制单位资格证、武器装备质量体系认证证书及技术贸易资格证，是陕西省民口军工科研配套单位，被中央军委装备发展部批准为 A 类装备承制单位。

现有职工 104 人，厂房面积 12000 平方米，各类仪器设备 1000 多台套。拥有高素质、年轻化、学习型、创新型的科研团队，科研业务范围涵盖液压产品及附件、气压产品及附件、机电产品、有色金属及复合材料的研发、设计、制造、试验、检测、销售、维修、技术开发、技术转让、技术咨询、技术服务；普通货物道路运输等领域。

4.2 技术力量及人员构成

姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
张琛	西安红庆机械厂	男	36	教授	道路与铁道工程	项目负责人
张正伟	西安航空学院	男	36	讲师	道路与铁道工程	原材料调研、比选
鹿新平	陕西路桥集团有限公司	男	38	项目经理	道路工程	室内试验
刘美红	西安红庆机械厂	男	30	工程师	道路与铁道工程	室内试验
屈鑫	长安大学	男	36	讲师	道路与铁道工程	多尺度分析

肖珂	长安大学	女	36	博士生	道路与铁道工程	协助室内外试验
马子业	长安大学	男	28	博士生	道路与铁道工程	协助室内外试验
牛高峰	西安红庆机械厂	男	56	工程师	道路与铁道工程	技术指导
杨亚萍	西安航空学院	女	50	教授	道路工程	技术指导
曹国震	西安航空学院	男	42	副教授	道路工程	材料、设备统筹

4.3 各自承担的主要工作

课题组由 10 位主要成员组成，其中高级职称 3 人，中级职称 4 人，博士 6 人。课题组长期致力于沥青路面性能研究、路面再生、新材料研发研究，拥有道路工程理论与实体工程建设、道路材料制备、多源信息数据处理等多方面、多学科领域背景，具有坚实的工作基础和较为丰富的研究经验，对该领域当前国际上的研究前沿及研究动态有较好的认知和把握，具备开展本项目的条件和能力，主要研究人员分工如下。

(1) 张 琛：撰写方案、主持研究、分配研究人员的研究任务

(2) 张正伟：主研人员，负责生物基原材料的化学组分与微观结构研究

(3) 燕 姣：主研人员，生物基材料与沥青的相容性及稳定性研究

(4) 鹿新平：主研人员，室内试验

(5) 刘美红：主研人员，黏附性试验

(6) 屈 鑫：实验结果的宏观与微观多尺度分析

(7) 肖 珂：协助室内外试验

(8) 马子业：协助室内外试验

(9) 牛高峰：技术指导

(10) 杨亚萍：对研究过程实施全面管理，参与课题研究工作

(11) 曹国震：提供人力、物力保障，参与研究工作，随时关注课题研究

4.4 项目主要负责人情况

张琛：博士，教授，硕士生导师，陕西省委组织部第 8 批“博士服务团”成员，挂职安康市交通运输局副局长。主要从事道路与机场工程的教学及研究工作，研究方向包括：绿色可持续、耐久性沥青路

面材料，公路及机场智慧建造及运维评估等。主持及参与国家重点研发计划、国家自然科学基金、中国博士后科学基金、陕西省自然科学基金等科技项目 20 余项，在国内外学术期刊上发表高水平学术论文 40 余篇，授权国家专利 10 余项，指导学生获中国国际互联网+大赛省级银奖 1 项，铜奖 2 项，获中国公路学会科学技术奖二等奖 1 项。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

（明确依托工程的规模、位置、点位或段位、工程技术特点等；依托实际工作要明确业务工作具体内容）

本项目依托工程是安康市宁陕县 345 国道新建至宁陕段，该项目起于宁陕县新建村(镇安界)，止于县城与 G210 线相接，全长 51.028 公里，其中三级路段（K22+560~K37+372.7）14.8 公里，路基宽 7.5 米；其余 36.2 公里为二级公路，路基宽 8.5 米。

该工程将为本项目提供 200 米试验段，用于项目研究初期获取沥青粘结剂等原材料，以及钻芯取样等新建状态下的技术性能参数；运营一定时期后，再次进行沥青粘结剂等原材料及钻芯取样等性能劣化状态下的技术性能参数；同时结合室内研究成果，研发针对该依托工程的生物基修复方案。

5.2 投资来源

本项目经费 24.5 万元，资金来源为陕西省交通厅。

5.3 工程进度与项目科研进度配合（科研与实际工程如何紧密结合）

（1）选拔专业及科研能力强的团队成员，负责项目的整体推进；配齐配足业务精、能力强的工程师和实验员，辅助完成相关试验研究及检测工作。

（2）按照项目期限，制定详细的分段研究控制计划。为了有效修复沥青路面技术性能，项目前期将在配套工程新建过程中收集沥青粘结剂材料。

（3）分析新建依托工程中沥青粘结剂的各方面性能，并以此为基础研发与之性能匹配的生物基修复方案。

5.4 组织管理形式

(1) 成立项目管理小组，由项目申请单位分管领导、项目负责人、项目申请单位科技管理部门负责人组成。管理职责包括：

- ①制定项目研究工作大纲、确定项目总体技术实施方案；
- ②审核项目执行情况报告、信息报表、科技报告等；
- ③决策项目执行中出现的重大事项，按程序报批需要调整事项。

(2) 定期对项目进度展开内部协调工作，组织课题组各成员召开负责单位项目交流会议。每个季度召开季度汇报会议，会议中项目参与成员汇报项目进展，以及各成员协调研究过程中出现的问题，并部署项目下一步工作安排。

(3) 课题组与协作单位将在严格守法、遵守公共道德的前提下进行充分协调、沟通，确保项目的顺利进行。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

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	24.5	合 计	24.5	24.5	
工程配套研究经费		1.设备费	0.0	0.0	
单位自筹		（1）购置设备费	0.0	0.0	
其他经费		（2）设备改造与租赁费	0.0	0.0	
		2.业务费	21.8	21.8	
		（1）材料费	5.6	5.6	
		（2）测试化验实验加工费	12.2	12.2	
		（3）燃料动力费	0.0	0.0	
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	1.2	1.2	
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	2.4	2.4	
		（6）其他费用	0.4	0.4	
		3.劳务费	1.2	1.2	
		（1）专家咨询费	1.2	1.2	
		（2）聘用人员劳务费	0.0	0.0	
		（3）其他劳务费	0.0	0.0	
		（二）间接费用	1.5	1.5	
		1.管理费	1.5	1.5	
		2.绩效支出	0.0	0.0	

七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

7.1 项目预期目标（项目的考核目标）

- （1）推荐符合规范要求的生物基原料；
- （2）揭示沥青再生修复机理；
- （3）提出生物基修复材料性能平衡设计准则；
- （4）提出一种与既有结构和服役环境匹配的道面修复方案。

7.2 提交的研究成果及其形式

- （1）研究报告 1 份；
- （2）国内核心级别以上论文 1 篇并标注项目编号；
- （3）软件著作权或专利 1 项；
- （4）生物基修复材料 1 种；
- （5）试验路段不少于 1 公里。

7.3 经济、社会、环境效益分析

（1）经济效应：

- ①以路用性能为前提，选择生物基油掺量为 10%-15%；
- ②生物沥青的生产成本可以降低 20%以上；
- ③生物沥青混合料价格便宜约 7%-10% ；
- ④能降低拌和温度约 10℃，预计同等条件下，可降低工程建设成本 15%-20%。

（2）社会环境效应：

- ①生物基材料属与可再生资源，使用其代替石油沥青；
- ②可降低沥青等不可再生资源的消耗与需求量；

③生物基资源高温裂解后用于道路工程建设，实现工业废料的回收利用，节能减排，推动路面材料绿色化，符合循环经济和环保的发展趋势。

八、其它需要说明的问题

无

九、申请单位意见

按照合同落实配套经费。



单位负责人：(签字)

Handwritten signature of the unit leader.

2022年10月20日

生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究项目 可行性研究报告评审意见

2022年10月17日，受陕西省交通运输厅委托，陕西省公路局在西安以视频会议形式主持召开了“陕西省交通运输厅生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究项目”（项目编号：22-20k）可行性研究报告评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了可行性研究报告，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目针对沥青路面早期病害治理现状问题，开展生物基沥青路面预防性养护材料研究，具有工程应用价值，立项必要。

二、研究内容较全面，目标明确，技术路线基本可行。

三、人员组成合理，前期基础扎实，依托工程落实，具备开展研究工作的条件。

建议：

1. 项目名称改为“生物基沥青路面预防性养护材料应用技术研究”。

2. 进一步凝练研究内容，突出研究重点。

主任委员：



2022年10月17日

专家审查意见表

项目名称	生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究（22-20K）				
专家姓名	边世斌	职务/职称	正高工	专 业	道路工程
专家单位	陕西交通技术咨询有限公司			联系电话	13709187350

评 审 意 见

1. 项目针对沥青路面早期病害治理现状，开展沥青路面预防性养护材料研究，具有工程应用价值，立项必要。

2. 意见和建议

(1) 项目名称改为“生物基沥青路面修复材料与应用技术研究”；

(2) 进一步突出研究重点，优化技术路线；

(3) 研究内容应增加生物基修复材料的应用场合分析、路用性能、应用效果评价等；

(4) 成果提交形式应具有实用价值。

评审专家（签字）：

2022年10月17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	陕西省交通运输厅生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究项目				
专家姓名	陈团结	职务/职称	正高	专 业	公路工程
专家单位	中交第一公路勘察设计研究院有限公司			联系电话	136592055

评 审 意 见

生物质沥青路面修复材料具有普通路面修复材料不可比拟的优势，本项目对此开展研究，具有一定的探索性和工程应用价值。可行性研究报告内容全面，理论性强，技术路线可行，同意通过评审。

几点建议：

1. 本研究的理论性较强，应用性研究部分稍有不足，建议补充；
2. 建议拓宽思路，选择更多的封层形式进行研究；
3. 项目名称中的“陕西省交通运输厅”“项目”等可以去掉。

评审专家（签字）：陈团结

2022年10月17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

(22-20K)

项目名称	生物基路面修复材料、预防性养护及融合应用研究				
专家姓名	王明	职务/职称	正高工	专业	公路工程
专家单位	陕西交控科技发展有限公司			联系电话	1380919882

审查意见

项目所对当前沥青路面养护现状、通过废物利用开发沥青路面预防性养护材料，具有现实工程价值，且必要。研究内容较为全面，技术路线可行，同意立项并立项。建议：

1. 题目改为“生物基沥青路面预防性养护材料应用技术研究”；2. 生物基材料用于抗滑密封养护，应予以长期力切入点；3. 调整技术经济指标的计算方法；4. 经费投入不足，应落实一定的工程配套费用；5. 扩大试验长度，以获取充足的试验研究数据。

审查专家（签字）：

王明

2022年10月17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	生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究				
专家姓名	罗强	职务/职称	教授	专 业	道路与铁道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	13908238607

评 审 意 见

打造品质工程是公路行业深化交通运输基础设施供给侧结构性改革的重要举措,对进一步推动我国交通运输基础设施建设向强国迈进具有重要意义。对于大量采用的沥青路面,常出现微裂缝、表面磨耗、抗滑衰减等表面功能损伤现象,多采取如封堵表面微裂缝、固结松散集料等预防性养护措施,进行针对性修复。其中,雾封层可以填封微裂缝和表面空隙,并具有防水和抑制松散作用,对避免表面轻微病害向深层发展有良好效果,成为目前应用较为广泛的预防性养护措施之一。然而,传统雾封层在应用过程中存在路表摩擦系数降低较快、表处材料易脱落等突出问题,是该技术进一步发展亟待突破的技术难题。为此,项目基于颗粒-浆体共混理念,提出采用由乳化沥青、生物基原料、填料、水及细骨料等主要成分构成的生物基路面修复材料——含砂雾封层预防性养护技术。选题符合我国绿色发展和创新驱动战略。

项目在国内调研的基础上,计划针对不同生物基料源的老化沥青再生修复机理、生物基修复材料与路面结构界面损伤行为等关键技术展开研究,提出生物基修复材料组分调控与配方优化方案、生物基修复材料与路面结构协同的修复方案,实现生物基路面修复材料——含砂雾封层对沥青路面早期病害的预防性养护、延长道路服役寿命的技术目标。拟定的主要研究内容包括:①不同料源生物基材料基本性质、各化学组分影响规律、分子模型与催化提纯及化学合成方法;②采用优选生物基原材的道面修复材料制备技术、面向多目标需求的生物基修复材料性能平衡设计准则及组分定向调控技术;③生物基修复材料对老沥青路面的再生效果及粘结性能随生物基原料类型、涂覆工艺、涂层结构及细骨料含量等的变化规律。

综上所述,项目选题具有较好工程价值,有一定前期科研及工作基础,拟解决的关键技术难题较清晰,研究目标明确,研究内容较完整,技术路线正确,实施方案可行,有依托工程,同意通过可行性研究报告,并在适当完善的基础上按项目合同实施计划执行。

具体建议:

- 1) 加强生物基路面修复材料——含砂雾封层耐久性研究;
- 2) 补充工程经济性分析研究内容;
- 3) 项目名称宜修改为“生物基沥青路面修复材料及工程应用技术研究”。

评审专家(签字):



2022 年 10 月 17 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	生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究				
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

本项目拟对生物基路面修复材料其化学作用机理、组分调控准则、界面损伤行为及长期性能表征开展一系列研究，具有现实意义，立项必要。

提交的可研报告，研究目标明确，研究内容较全面，技术路线基本可行。研究人员组成合理，前期基础扎实，依托工程落实，经费预算较合理，具备开展研究工作的条件。

同意该可研报告通过评审。

建议：

- 1. 题目中生物质改为生物基，与正文中表述一致。
- 2. 鉴于该类技术和产品在国内外已有研发和应用，本研究需进一步结合陕西省的路面和交通组成条件，重点突出抗滑性、耐久性和经济性的特点，落脚点应是工程应用。
- 3. 增加细集料选择、最佳粒度、最佳掺配量和最佳厚度等研究内容。

评审专家（签字）：王松根

2022 年 10 月 17 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家意见处理表

项目名称：生物基沥青预防性养护材料应用技术研究

(项目编号： 22-20k)

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	边世斌	1.项目名称改为“生物基沥青预防性养护材料应用技术研究”; 2.进一步突出研究重点, 优化技术路线; 3.研究内容应增加生物基修复材料的应用场合分析、路用性能、应用效果评价等; 4.成果提交形式应具有使用价值。	1.项目名称已修改; 2.研究内容补充了第4部分, 聚焦了耐久性研究内容, 见 P18; 3.应用场合分析、路用性能、应用效果评价等相关内容已补充到研究内容4, 见 P18; 4.成果提交形式中补充了“生物基修复材料1种”, 见 P28.
2	陈团结	1.应用型研究部分稍有不足, 建议补充; 2.建议拓宽思路, 选择更多的封层形式进行研究; 3.项目名称中的“陕西省交通厅”“项目”等可以去掉。	1.研究内容补充了第4部分, 聚焦了耐久性研究内容, 见 P18; 2.不同封层形式已补充到研究内容第4部分, 见 P18; 3.项目名称已修改。
3	曹可勇	1.题目改为“生物基沥青路面预防性养护材料应用技术研究”; 2.生物基材料用于抗滑雾封层养护, 应以耐久性为切入点; 3.调整技术经济指标的计算方法; 4.经费远远不足, 应落实一定的工程配套费用; 5.扩大试验段长度, 以获取充足的试验研究数据。	1.项目名称已修改; 2.研究内容补充了第4部分, 聚焦了耐久性研究内容, 见 P18; 3.技术经济指标的计算已考虑大修成本随服役年限增长而增多, 见 P20; 4.经费已再次和相关单位进行商讨, 尽快落实工程配套费用; 5.试验段长度由原 200 米延长至 500 米。
4	罗强	1.加强生物基路面修复材料-含砂雾封层耐久性研究; 2.项目中的关键科学问题应该该向工程应用靠拢; 3.项目名称改为“生物基沥青预防性养护材料应用技术研究”	1.补充了第4项研究内容, 聚焦了应用研究及耐久性的研究内容, 见 P18. 2.补充了2项工程应用的关键科学问题, 见 P17; 3.项目名称已修改。
5	王松根	1. 题目中生物基改为生物基, 与正文中表述一致; 2. 鉴于该类技术和产品在国内外已有研发和应用, 本研究需进一步结合陕西省的路面和交通组成条件, 重点突出抗滑性、耐久性和经济性的特点, 落脚点应是工程应用; 3. 增加细集料选择、最佳粒度、最佳掺配量和最佳厚度等研究内容。	1.已经全文修改; 2.研究内容补充了第4部分, 聚焦了抗滑性、耐久性研究内容。 3.细集料选择、最佳粒度、最佳掺配量和最佳厚度等研究内容已补充到研究内容4中, 见 P18.

陕西省交通运输厅生物质路面修复材料性能优化及融合演化规律研究项目 (项目编号: 22-20k)

可行性研究报告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	边世斌	陕西交通技术咨询有限公司	道路与铁道工程	道路工程	正高工	
2	委员	陈团结	中交一公院/ 中交瑞通	道路与铁道工程	道路工程	正高工/总经理	
3	委员	曹可勇	陕西高速咨询技术有限公司	道路与铁道工程	道路工程	正高工	
4	委员	罗强	西南交通大学	道路与铁道工程	铁道工程	教授	
5	委员	王松根	山东省公路局	道路与铁道工程	道路工程	正高工/局长	

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

本人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。

承诺人（项目负责人签字）：

2022年10月20日