

项目合同编号：24-85K

陕西省交通运输厅 2024 年度交通科研项目

# 合 同 书

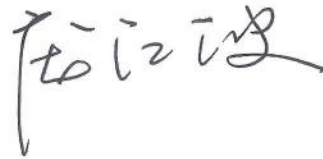
项目名称：厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用

承担单位：陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

# 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： 

年 月 日

项目合同编号：24-85K

## 陕西省交通运输厅 2024 年度交通科研项目

# 合 同 书

项目名称：厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用

承担单位：陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

项目负责人：庞江波

通讯邮编、地址：725000 陕西省安康市汉滨区建民街道办事处安康收

费站

传真、电话：0915-3521200

起止年限： 年 月 至 年 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) 高模量再生沥青混合料级配优选
- (2) 高价值再生-大掺量高模量再生沥青混合料研究；
- (3) 再生沥青混合料路面结构适用性研究；
- (4) 公路废旧材料循环利用技术效益分析。

### 2. 技术关键

- (1) 完成 RAP 掺量大于 50%的高模量再生沥青混合料技术体系。

借助老化沥青变硬的特点进行以高模量为性能方向的再生设计研究，研究 RAP 接团特征以及预处理方式，通过集料的级配优选，提高再生混合料的性能，并且研究 RAP 掺量对高模量再生沥青混合料压实特性及路用性能的影响，为大比例掺量的旧料再生提供一种有效方法。

- (2) 再生沥青混合料路面结构适用性研究。

基于路面结构力学响应，对高性能再生沥青混合料应用层位提高可行性进行研究，推荐再生沥青混合料合理使用层位，提升废旧材料再生利用空间和价值

- (3) 采用寿命周期评价（LCA）方法，定量评价各再生循环利用技术综合效益。

从原材料生产过程、运输过程、路面工作过程、路面材料处理过程等四个方面对循环利用效益进行分析，构建公路养护再生评价体系。同时沥青路面再生循环利用技术在干线公路中推广应用，结合重点示范推广工程，进行后期的长期性能观测评估。

### 3. 依托工程（依托工作）

本课题依托工程为陕西交通控股集团有限公司白泉分公司 2024 年路面养护工程。

## 二、考核指标

### 1. 预期目标

本课题拟通过对废旧材料和再生技术的调研，系统总结已有再生循环利用技术应用体系。此外，通过集料级配优选，将大掺量再生技术与高模量沥青混合料 EME 技术有机结合，研究探索硬质的旧沥青路面固废材料用于制备功能型高模量沥青混合料的可行性；同时，对高性能再生沥青混合料应用层位提高可行性进行研究，提升废旧材料再生利用空间和价值；在此基础上，基于寿命周期评价方法，评价各再生资源循环利用综合效益。

### 2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

在公路废旧材料循环利用综合技术研究中，通过将废旧沥青混合料高价值再生，用于高模量再生沥青混合料中，节约道路沥青、集料等不可再生资源，实现路面废旧材料的高效再生利用。主要技术经济指标：

（1）实现铣刨料高效利用，铣刨料掺量 $\geq 50\%$ ；

（2）在满足路用性要求的情况下，预计节约工程材料成本 20%以上，减少路面能耗和排放 15%以上。

### 3. 经济和社会效益

实现铣刨料高效利用（铣刨料掺量 $\geq 50\%$ ），对再生实现恢复疲劳寿命 80%以上；基于 RAP 掺量及关键指标推荐再生沥青混合料最佳路面结构应用层位，提出再生沥青混合料不同应用层位下的关键技术控制措施。在满足路用性要求的情况下，预计节约工程材料成本 20%以

### 4. 成果提供形式

（1）课题研究报告；

（2）《公路废旧材料循环利用指导手册》；

（3）优化再生混合料低温和疲劳性能评价方法，建立相应的性能指标体系；

（4）发表论文 2 篇，申请专利 1 项；

### 5. 其他考核指标

培养相关技术人才不少于 2 名；开展的媒体宣传报道不少于 3 次；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）
2024-06 至 2024-09	分析国内外沥青路面循环利用养护技术及材料的发展现状，重点调研养护技术的利用效率。
2024-10 至 2024-12	借助新旧料的正交组配、设计三种级配类型，通过抽提筛分，用新料拟配三种级配的混合料研究级配对高模量再生沥青混合料性能影响，通过高模量再生沥青混合料的路用性能初步拟选较优级配。
2024-01 至 2025-04	借助老化沥青变硬的特点进行以高模量为性能方向的再生设计研究，研究 RAP 预处理方式，RAP 掺量对高模量再生沥青混合料压实特性及路用性能的影响，为大比例掺量的旧料再生提供一种有效方法。
2025-05 至 2025-07	分析高比例再生沥青混合料应用层位、结构层厚度、再生料回弹模量、施工工艺以及荷载等因素对路面结构拉应力和拉应变等力学响应的影响，优化再生沥青混合料路面机构组合，推荐再生沥青混合料的合理使用层位，提出不同使用层位下的关键技术控制措施。
2025-07 至 2025-10	从原材料生产过程、运输过程、路面工作过程、路面材料处理过程等四个方面对旧料循环利用效益进行分析，构建公路养护旧料再生利用评价体系。同时沥青路面再生循环利用技术在干线公路中推广应用，结合重点示范推广工程，进行后期的长期性能观测评估。组织最终成果评审，并根据专家意见修改完善，配合业主单位结题验收。

#### 四、项目经费

项目总经费： 59.877 万元  
交通运输厅补助： 19.877 万元  
承担单位自筹： 20 万元  
工程配套研究经费： 20 万元  
其他经费： 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	50.877	19.877
1.设备费	3	3
(1) 购置设备费	0	-
(2) 设备改造与租赁费	3	-
2.业务费	42.477	12.477
(1) 材料费	9	-
(2) 测试化验实验加工费	12	-
(3) 燃料动力费	3	-
(4) 差旅费/会议费/国际合作与交流费	4.477	-
(5) 出版/文献/信息传播/知识产权事费	6	-
(6) 其他费用	8	-
3.劳务费	5.4	5.4
(1) 专家咨询费	1.2	-
(2) 聘用人员劳务费	3.2	-
(3) 其他劳务费	1	-
(二) 间接费用	9	0
1.管理费	4.8	-
2.绩效支出	4.2	-
合 计	59.877	19.877



## 五、承担单位或研究人员分工

项目承担单位：陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

长安大学

项目负责人： 庞江波

主要研究人员及分工：

陈玉	负责制定研究方案
车玲利	室内试验、现场监测
井龙飞	项目组织协调室内试验、现场监测
张冬冬	室内试验、现场监测
李黎	室内试验、现场监测
王岩	室内试验、现场监测
胡佳俊	室内试验、现场监测

## 六、项目参加人员表

项目承担单位:

参与单位（排序）：陕西交通控股集团有限公司白泉分公司、长安大学。

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	庞江波	1980.10	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	高级工程师	公路	项目负责人	
主要研究人员							
2	陈玉	1981.11	长安大学	教授	交通工程	技术负责人	
3	车玲利	1984.04	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	中级工程师	公路	室内试验、现场监测	
4	井龙飞	1988.07	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	中级工程师	公路	项目组织协调	
5	张冬冬	1985.11	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	中级工程师	公路	室内试验、现场监测	

6	李黎	1987.05	陕西交通控股集团有限公司 白泉分公司	中级工程师	公路	室内试验、现场监测	
7	王岩	1992.11	陕西交通控股集团有限公司 白泉分公司	中级工程师	公路	室内试验、现场监测	
8	胡佳俊	1997.03	长安大学	室内试验、现场监测	交通工程	室内试验、现场监测	
9	宋浩然	1998.06	长安大学	室内试验、现场监测	交通工程	室内试验、现场监测	

## 七、信息表

项目合同编号	24-85K	密级	/	A: 机密 B: 秘密 C: 内部					
项目名称	厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用								
项目实施所在地	陕西省	起止年限	年 月至 年 月						
总经费	59.877	厅拨	19.877						
第一承担单位	单位名称	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司							
	所在地	陕西省安康市(市、区)	代码	610900					
	通讯地址	陕西省安康市汉滨区建民街道办事处安康收费站	邮编	725000					
	单位性质	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	长安大学							
	2								
	3								
项目负责人	姓名	庞江波	性别	(1) 1.男 2.女	出生年份	1980.10			
	学历	(2) 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	15891558309	电子邮箱	714299019@qq.com					
项目联系人	姓名	井龙飞	性别	男					
	联系电话	15309131771	电子邮箱	83422762@qq.com					
项目组人数	9	高级	2	中级	7	初级		其它	
主要研究内容(100字以内)	(1) 高模量再生沥青混合料级配优选 (2) 高价值再生-大掺量高模量再生沥青混合料研究 (3) 再生沥青混合料路面结构适用性研究 (4) 公路废旧材料循环利用技术效益分析								
成果属性	A、B	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							

## 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. 合同正本一式拾份，甲方单位伍份，承担单位伍份。
8. 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、合同签约各方

合同甲方：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

李涛

年 月 日

联系人：（签字）

张娟

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

单位负责人：（签字）

王琪

年 月 日

项目负责人：（签字）

任江波

（公章）

电 话：0915-3521200

财务负责人：（签字）

张

账 户 名：陕西交通控股集团有限公司

开户银行：招商银行股份有限公司西安分行营业部

帐 号：129912492810828

项目编号: 24-85K

## 2024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: 厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术  
研究与应用

申请单位: (盖章) 陕西交通控股集团有限公司白  
泉分公司

联系人: 庞江波

电 话: 0915-3521200



陕西省交通运输厅制

2024年8月

项目编号：24-85K

# 2024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：厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术  
研究与应用

申请单位：（盖章）陕西交通控股集团有限公司白  
泉分公司

联系人：庞江波

电 话：0915-3521200



陕西省交通运输厅制

2024年8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。

# 目 录

一、项目研究的背景和必要性 .....	1
二、前期科研及工作基础 .....	2
1.国内外研究现状 .....	2
1.1 沥青路面再生技术应用概况 .....	2
1.2 国内外沥青路面再生技研究现状 .....	3
1.3 再生沥青混合料的节能减排 .....	7
2.项目前期科研及现有工作条件 .....	8
3.参考文献 .....	9
三、实施方案 .....	12
1.拟解决的关键问题 .....	12
2.主要研究内容及实施方案 .....	12
2.1 主要研究内容 .....	12
2.2 实施方案 .....	13
2.3 技术路线 .....	16
4.后续技术改造或基本建设计划的衔接 .....	16
5.有关技术经济指标 .....	17
四、项目承担单位及参加单位概况 .....	17
1.单位概况 .....	17
2.技术力量及人员构成 .....	19
3.各自承担的主要工作 .....	20
4.项目主要负责人情况 .....	20
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件 .....	21
1.依托工程（工作）概况 .....	21
2.投资来源 .....	21
3.工程进度与项目科研进度的配合 .....	21
4.组织管理形式 .....	21
六、项目经费估算及资金筹措情况 .....	22
七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益 .....	23

1.项目预期目标（项目的考核目标） .....	23
2.提交的研究成果及其形式 .....	23
3.经济、社会、环境效益分析 .....	23
八、其它需要说明的问题 .....	24
九、申请单位意见 .....	24

## 一、项目研究的背景和必要性

全球性的能源紧张和气候变化已成为国际社会普遍关注的重大问题，节能减排已成为国际社会的共同责任，应对气候变化逐渐从理念层面、局部实践走向全球联合行动。2009年《联合国气候变化框架公约》第15次缔约方会议暨《京都议定书》达成了《哥本哈根协议》，就发达国家实行强制减排和发展中国家采取自主减排行动做出了安排。之后就全球长期目标、资金和技术支持、透明度等焦点问题达成了广泛的共识，并在交通运输中对于路面的再生利用也开始逐步推进。2008年至2015年期间，各省陆续出台了地方性的再生技术指南及规范，但再生技术推广并不乐观。究其原因，根据再生沥青路面的综合经济效益结果分析，当RAP掺量低于20%时，新路面与再生路面建设的经济效益并没有太大的差距。此外，据不完全统计，我国每年有接近2亿吨的路面铣刨料，由此引发出许多环境和经济等问题。因此在绿色发展的时代背景下，加快废旧材料再生高效利用的研究，提高RAP掺量的研究势在必行。

综合国内外研究趋势，虽然沥青路面再生技术得到了广泛研究与应用，但高RAP掺量仍然非常少见，其中有着诸多因素，如：混合料性能要求、施工当地政策限制、施工过程技术要求等。对美国各州在2009-2011年期间旧料的掺量进行了调查，结果表明虽然许多州交通部的规范允许旧料的掺量超过25%，但是旧料掺量超过20%州的数量不超过一半，大部分仍然在20%以下。国内情况也是如此，我国《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521-2019)虽然没有明确限定RAP的掺量上限，但是规范中包含一个条文说明，即“厂拌热再生混合料用于面层时，掺配比例超过30%需专门论证决定”。因此在进行再生混合料级配设计时，工程人员倾向于选择一个规范推荐范围内的安全的旧料掺配比例，大大制约了旧料掺量再生的应用。此外，传统再生技术对再生混合料的路用性能恢复效果较差，不同旧料的恢复可行性也是不同。

根据已有再生路面暴露出的种种问题，国内外开始将高模量技术应用在再生技术中。高模量沥青混合料是指具有较高油石比、较细级配、较低空隙率特点的一类沥青混合料。高模量沥青混合料的胶结料通常向低标号沥青或硬质沥青中掺入一定量的高模量添加剂，对基质沥青进行改性。然后再通过调整油石比和级配弥补硬改性沥青胶结料低温抗裂性能和疲劳性能不足等问题。因此，结合再生技

术，通过添加高模量沥青形成了以高温性能、低温性能、疲劳性能和模量等性能为导向性的高模量再生沥青混合料的设计方法。从而解决已有再生路面和再生技术暴露出的问题。并根据研究高模量再生沥青混合料特征性能模拟并推荐适用的路面结构层。

在此背景下，本项目拟对公路沥青路面循环利用技术开展如下研究：通过将分档的旧料与新料进行正交组配，设计三种新的级配，对设置的多组三种级配集料混合料进行抽提筛分，根据筛分结果，得到由质量通过百分率、分级筛余量以及累计筛余量，进而反算各类型级配的高模量沥青混合料，并通过高模量沥青混合料的路用性能初步选定较优级配类型，从而依此确定高模量再生沥青混合料的级配设计；将大掺量热再生技术与法国高模量沥青混合料技术有机结合，研究探索硬质的旧沥青路面固废材料用于制备功能型高模量沥青混合料的可行性；对高性能再生沥青混合料应用层位进行研究，提升废旧材料再生利用空间和价值；基于寿命周期评价方法，评价各再生技术的节能减排和资源循环利用综合效益。

在上述研究的基础上可形成针对陕西省系统的路面废弃材料再生技术体系，并指导再生技术在陕西省现有公路建设项目中的大规模推广应用。从而公路废旧材料循环利用的成果将可广泛地应用于旧沥青路面改扩建工程之中，具有良好的推广前景。

## 二、前期科研及工作基础

### 1. 国内外研究现状

#### 1.1 沥青路面再生技术应用概况

根据我国交通运输部《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T5521)的定义，沥青路面再生是指：采用专用的机械设备对旧沥青路面或回收沥青路面材料进行处理，并掺加一定比例的新集料、新沥青、再生剂（必要时）等再次形成路面结构层的技术。

东南大学赵永利<sup>[1]</sup>提出，沥青路面再生是一个广义的概念，可以根据不同工艺所产生的效果将沥青路面再生技术划分为再生和再利用。其中，再生是指将沥青路面回收材料（Reclaimed Asphalt Pavement, RAP）作为一种主要原材料，按照原有材料性能或接近原有材料性能要求进行加工和使用；而再利用同样是以旧

料作为主要原料，但按照有别于原有材料的性能要求对其进行再加工和使用。从这个角度解读，厂拌热再生和就地热再生混合料的性能要求与新料基本一致，属于再生技术；而厂拌冷再生和就地冷再生混合料的性能要求侧重于劈裂强度，更接近于对路面基层材料性能的要求，属于对沥青路面回收材料高效能的再利用。

## 1.2 国内外沥青路面再生技术研究现状

上世纪九十年代以来，中国高速公路飞速发展。至今，许多沥青路面已经步入养护维修阶段，全国的施工重点也慢慢从新建向着养护转移。关于高效合理利用 RAP 料的研究正在兴起。沥青再生技术包括热再生技术和冷再生技术。这两种再生方式各有其优缺点及适用性，因此不同再生方式下的再生混合料性能决定了其可再生的层位。

热再生是指将回收后的 RAP 加热之后，通过修正级配、添加再生剂（必要时）以及补充新沥青，使回收料成为优良的再生沥青混合料的工艺<sup>[2]</sup>。其中，厂拌热再生是应用最广泛、最实用的路面再生技术。然而，热再生技术也面临着相关技术难题，例如：RAP 掺量有限、加热拌和过程中产生的老化及热再生过程不满足清洁要求等，诸多原因制约了热再生技术的发展。

### (1) 高 RAP 掺量再生沥青混合料

高 RAP 掺量再生沥青混合料是指 RAP 掺量达到 25% 以上。出于对高 RAP 掺量再生混合料性能的担忧，在将再生混合料应用于高等级公路或中上沥青面层时，RAP 的掺量受到了严格的限制，这极大地制约了高 RAP 掺量厂拌热再生技术的发展和应用。

目前中国厂拌热再生沥青混合料 RAP 的掺入比例一般不超过 30%，限制 RAP 掺量低的因素大致有以下几个方面：RAP 料前期储存不佳、RAP 料的变异性较大、再生剂的恢复效果不佳、厂拌热再生拌和设备效率不高和厂拌热再生混合料的设计理论不足等。在再生过程中加入低掺量的 RAP 并不能解决日益增长的回收料问题，对再生资源的利用率不高，导致再生效益不明显。因此，如何提高 RAP 的掺量越来越受到人们的重视。国内外道路工作者对高 RAP 掺量的再生沥青混合料的性能进行了大量的研究。按照现有的研究检验，当沥青老化时材料变硬，那么再生料应有着良好的高温性能。然而当旧料掺量增大时，通常需要使用各类再生剂使沥青软化，以达到再使用的要求，此时就必须重新重点评估再生

混合料的高温性能，原因是再生剂的润滑作用，可能会造成再生料高温性能变差<sup>[3]</sup>。而在疲劳和断裂性能方面，West 等<sup>[4]</sup>使用疲劳断裂能指标评价了再生料和新料的疲劳性能，发现高 RAP 掺量的再生料的疲劳性能确实不如新沥青混合料。并且相关试验也表明，高 RAP 掺量的再生沥青混合料在低温和高频车载的作用下，极易结构破坏和出现裂缝<sup>[5,6]</sup>，这也是国内外许多部门不允许使用高 RAP 掺量再生料的原因之一。在水损害方面，Loria 等<sup>[7]</sup>研究了加拿大某地区 RAP 掺量高达 50%的热拌沥青混合料路面，发现高 RAP 掺量的热拌沥青混合料具有可接受的抗水损害性能。Karlsson 等<sup>[8]</sup>指出，由于 RAP 料已经被旧沥青覆盖，导致水较难渗透进集料中，因此高 RAP 掺量再生沥青混合料有着比新沥青混合料更好的抗松散性能。

### (2) 温拌再生技术

为了解决热拌沥青混合料在生产使用过程中会出现有毒废气、能源过度消耗以及老化等问题，温拌沥青混合料技术应运而生。温拌沥青混合料是通过某种技术手段或掺入添加剂，提高再生混合料在低温条件下的拌和性。WRMA 自身的拌和与摊铺温度可以比热拌沥青混合料降低 30°C左右，并能够显著降低能源消耗，减少环境污染，降低摊铺现场气味粉尘的排放，同时又能具有和热拌沥青混合料基本相同的施工和易性和路用性能<sup>[9]</sup>。Rouzbeh 等<sup>[10]</sup>研究发现，某有机类 WRNA 在低温条件下具有更好的应力松弛和低温抗裂性能。Wang 等<sup>[11]</sup>的弯曲梁蠕变实验结果表明，温拌再生沥青混合料的低温抗裂能力优于热拌沥青混合料。另外，由于旧料加热温度变低，沥青二次老化程度大大降低，因此可适当提高 RAP 的掺量，节约成本和资源。

关于 WRNA 添加剂，大致可分为以下类别：有机添加剂、化学添加剂以及使用发泡技术的添加剂。有机添加剂主要包含有机蜡，可以降低沥青的黏度。化学添加剂一般是由一些表面活性剂、乳化剂、抗剥落剂、集料涂层增强剂组成。化学添加剂对沥青进行化学改性，使其获得活性黏附力，提高了沥青对骨料的包裹性能。而发泡技术添加剂则是利用产生的水蒸汽，增加沥青的体积且降低了沥青的黏度，有利于沥青混合料在相对较低的温度下进行拌和、压实<sup>[12]</sup>。

### (3) 高模量再生沥青混合料

随着沥青路面再生技术研究的不断深入,一些新的再生混合料设计理念逐渐开始产生和发展,例如高模量再生沥青混合料、橡胶再生沥青混合料等的设计与应用,这种再生理念不同于传统方法将老化沥青混合料按原有性能进行逆向恢复,而是将旧沥青路面材料看作一种原料,通过一定设计及改性使得再生混合料具有特殊功能以满足沥青路面特定层位功能需求。

高模量沥青混合料 (High Modulus Asphalt Concrete, HMA) 起源于上世纪 80 年代的法国,法国对高模量的定义是:复数模量(15°C, 10Hz)大于 14000MPa。HMA 的特征在于通过硬质沥青的高黏度来增加胶结料与集料间的粘结力,配合比设计采用高沥青含量和低空隙率来确保矿料形成密实结构,进而增加沥青混合料的强度和高温稳定性,并保证其抗疲劳性能。HMA 起初作为新建路面的基层材料使用,如今常将其用于沥青路面中下面层,与超薄沥青混凝土磨耗层(约 2~3cm)相结合使用。利用 HMA 的高强度、高模量保护基层,利用超薄沥青混凝土磨耗层的抗滑性、耐久性能抵抗车辆荷载对路面的磨耗,最终提高沥青路面的耐久性和使用寿命。

法国道路与桥梁研究中心 (Laboratoire Central des Ponts et Chaussees, LCPC) 2007 年对应用于表面层和联结层的高模量沥青混凝土进行了再生研究,旧料掺配比例可达到 50%<sup>[13]</sup>。2008 年,LCPC 利用道路磨耗层中的半粗式沥青混凝土进行了高模量沥青混合料再生研究,其中回收半粗式沥青混凝土的掺配比例达到 50-65%,LCPC 对再生所得的沥青混合料进行了模量和体积指标测试,测试结果表明再生混合料的模量能达到 14000MPa 的高模量标准。

西班牙研究人员应用低标号硬质沥青和高 RAP 掺量设计和制备了高模量沥青混合料 (R-HMA),并对高模量再生混合料的适用性进行了分析。该项目分别对掺加旧料比例为 0%、15%、30%和 50%的再生沥青混合料进行了体积指标、力学性能(包括劲度模量、韧度、抗水损坏性能、抗车辙性能、疲劳性能)的分析研究。研究结果表明:应用低标号硬质沥青和高掺量 RAP 制备高模量再生沥青混合料是可行的,且掺加旧料后的再生沥青混合料性能接近甚至在一些方面优于新拌高模量沥青混合料。由于新添加的低标号硬质沥青在黏度上与 RAP 中老化沥青相近似,因而试验设计的高模量再生混合料在动态模量和抗裂性能方面与新拌高模量沥青混合料相似。随着 RAP 掺量的增加高模量再生混合料的水稳定



性降低，但在 50%RAP 掺量下依旧满足规范要求（ITSR>80%）。基于全面的路用性能表现，在对旧料进行充分预热的情况下，RAP 掺加比例可以增至 50%；如果旧料没有提前预热，为满足规范规定的路用性能标准，旧料的掺加比例最高为 30%<sup>[13,14]</sup>。

东南大学耿磊<sup>[15]</sup>根据法国沥青混合料设计指南提出的 EME-20 和常用的 AC-20 级配范围选择了四种混合料级配，采用湖沥青改性沥青制备了 0-50%不同旧料掺量的 R-HMAC，并进行了力学性能、高温性能、低温性能、水稳定性、疲劳性能等一系列性能试验。在力学性能与水稳定性和低温性能方面，试验结果表明旧料的掺入对上述三项混合料性能并没有产生明显的消极影响；在高温性能方面，当旧料掺量低于 50%时，R-HMAC 与不含旧料的 HMAC 的高温性能相当，当旧料含量超过 50%时，R-HMAC 的高温性能急剧下降；在疲劳性能方面，由于随着旧料含量的增加混合料沥青膜厚度随之增大，因此 R-HMAC 的疲劳性能随着旧料含量的升高而增加。在一系列性能试验中，随着旧料掺量的增加，混合料性能产生变异性的概率加大，鉴于再生混合料的路用性能试验，建议 R-HMAC 的旧料掺量不宜超过 50%。

事实上，除了法国的高模量沥青混凝土再生技术以外，荷兰也将 RAP 应用于多孔沥青路面（Porous Asphalt Pavement, PAP）的建设当中，并且由于长期老化与重复的再生利用，荷兰储备的部分 RAP 老化程度非常高，常遇到针入度低于 10（0.1mm）的情况。在这种情况下，如需对老化程度极高的旧沥青进行再生，则需要根据新老沥青调和再生规律，加入标号很高的软质沥青原来达到综合的效果。而这将极大地影响再生沥青混合料的路用性能。然而，一些学者发现，由于老化沥青的严密包裹，RAP 能够提供强于普通新拌沥青混合料的水稳定性能。基于这个出发点，荷兰的研究人员对 RAP 进行严格的筛分以控制再生混合料级配与沥青含量的变异性，将 RAP 中的细料筛除，仅留下均匀的粗骨料应用于多孔沥青路面的设计与生产当中，这为重复多次利用 RAP 料提供了一种新的应用途径。

针对 R-HMAC 的研究，从初期的法国高模量沥青路面再生利用与性能恢复，发展到将普通的老化沥青混合料作为一种原材料投入到高模量沥青混凝土的制备当中，不再局限于传统的沥青及沥青混合料再生理念，而是基于老化沥青针入

度低、黏度大等特点,采用与之流变性能相近的低标号硬质沥青或硬质改性沥青设计及制备性能有别于老化沥青混合料原始状态的高模量再生沥青混合料。对于荷兰含 RAP 的多孔沥青路面设计研究,也脱离了传统沥青混合料性能恢复的原始出发点,转而将 RAP 中的粗料分离出来作为多孔沥青混合料的原料。这说明,在热拌再生领域范畴内,沥青混合料的再生被赋予新的意涵,而非仅仅局限于原始性能的恢复。回收沥青混合料可以作为一种宝贵的原材料,在进行一系列处理和设计之后,用于制备实际工程中所需要的不同种类沥青混合料。

综上所述,高掺量 RAP 应用受到再生料路用性能的限制。当 RAP 掺量增加时,再生料高温性能会增加,而再生料的低温性能、水稳定性能均会有所下降。为解决这类问题,可通过添加再生剂即可有效地改善低温性能、水稳定性能,但再生料的高温性能反而又会降低。因此,很难使得再生料在高温方面的性能和低温方面的性能之间取得一种良好的平衡。在了解高模量的设计方法之后,发现 RAP 料和高模量沥青混合料都有着模量较高、级配较细的共同点,故考虑采用高模量的设计方法并向其中加入温拌剂使混合料易于成型,从而解决大旧料掺量所带来的再生料在高温方面的性能和低温方面的性能之间难以取得较好平衡的关键问题。

### 1.3 再生沥青混合料的节能减排

随着国家对环境保护越来越重视,对沥青再生过程中的污染和排放环节的把控越来越严格。相关研究表明,沥青烟气中多环芳烃的种类和浓度与 RAP 材料有关,RAP 产生的沥青烟气具有更大的危害性,因此值得研究者投入更多的关注<sup>[16]</sup>。

徐世法等<sup>[17]</sup>研发了双组份的抑烟除味剂,采用空气采样器和紫外可见分光光度计等设备对有害气体的浓度进行了测试,并计算有害气体的降解率。试验发现,该抑烟除味剂对氨、氮氧化物、硫化氢和二氧化硫的降解率分别为 66%、55%、61%和 60%,具有明显的抑烟和除味效果。在沥青烟的处理问题上,除了传统的燃烧法、电捕法和洗涤法等手段外,研究人员发现将沥青进行改性也可有效治理沥青烟。黄刚等<sup>[18]</sup>研究发现,膨胀石墨掺入沥青后,石墨层片被沥青中轻质组分溶胀,轻质组分和多环芳烃部分插入膨胀石墨层片间并形核结晶长大或吸附于膨胀石墨表面,范德华力和晶格能的束缚能有效抑制沥青烟释放。黄刚等

[19]还提出了一个基于质量法的沥青烟排放量评价方法，采用冻干技术消除水分对沥青烟测定准确性的干扰，并在 5 种吸附材料中优选出纯净聚丙烯纤维棉作为收集沥青烟的高性能吸附剂，获得了良好的除烟效果。王朝辉等[20]为确定电气石改性沥青的对沥青烟的治理效果，进行 17%掺量下的电气石改性沥青的沥青烟排放浓度测试。在 160°C和 180°C下，电气石改性沥青的沥青烟减排率可达 48.6%和 65.9%，电气石改性沥青具有良好的除烟功效。

研究人员发现应用再生沥青混合料技术可以减少大量的碳排放，降低能耗，实现清洁化。Auranzeb 等[21]采用综合型生命周期分析方法分析再生沥青路面混合料对路面建设和养护能量消耗和温室气体排放的影响。研究把生命周期分为材料生产、施工、维护和修复四个阶段，其中施工、维护、修复三阶段采用基于过程的生命周期分析方法，材料生产阶段则采用基于输入-输出的生命周期分析方法。研究发现，施工阶段期间的能耗和排放只占总能耗的 6%-8%，材料生产占大部分。而在材料中增加再生沥青的用量，可显著降低能耗和排放。当 RAP 掺量增至 30%-50%时，每公里路面 CO<sub>2</sub> 减排量可达 38114-63542kg。Chowdhury 等[22]采用基于过程的生命周期分析方法对比分析了新拌沥青混合料和再生沥青混合料用于路面建设时的环境影响，研究结果表明，采用再生沥青混合料修筑路面能产生较好的节能减排效果，同时兼顾改善生态环境的优势。Chen 等[23]从时间角度对再生沥青路面的温室气体排放进行了定量分析，在生命周期清单评估中，采用二氧化碳随时间变化的衰减函数来捕捉时间效应。随着 RAP 料含量的增加，温室气体排放量会发生减少。

## 2. 项目前期科研及现有工作条件

### (1) 陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

陕西交通控股集团有限公司白泉分公司成立于 2021 年 06 月 04 日，注册地位于陕西省安康市汉滨区建民办事处安康收费站。经营范围包括一般项目：园林绿化工程施工；普通机械设备安装服务；公路水运工程试验检测服务；规划设计管理；信息咨询服务（不含许可类信息咨询服务）；新材料技术研发；国内贸易代理；供应链管理服务；以自有资金从事投资活动；工程管理服务；土石方工程施工；工程技术服务（规划管理、勘察、设计、监理除外）；工程和技术研究和试验发展；地质勘查技术服务（除依法须经批准的项目外，凭营业执照依法自主开展经营活动）

开展经营活动)。许可项目：公路管理与养护；地质灾害治理工程施工；建设工程监理；公路工程监理；建设工程勘察；住宿服务；餐饮服务；房地产开发经营；建设工程质量检测；各类工程建设活动；建筑智能化工程施工；房屋建筑和市政基础设施项目工程总承包。白泉分公司管养 208.872 公里高速公路，全线为沥青混凝土路面。其中安康西段于 2010 年 12 月 26 日建成通车，安康东段于 2011 年 12 月 27 日建成通车。路线全段采用双向四车道高速公路标准建设，其中养护路段中 K188+500-K207+740 段为双向六车道。现有养护管理人员 21 名，平均年龄 35 岁，其中硕士学历 2 人，本科学历 15 人，先后获得“全国交通运输文化建设先进单位”、“全国青年安全示范岗”、“省级文明单位”等厅级及以上荣誉 80 余项，2023 年 1 月顺利通过“陕西省高速公路运营标准化试点”终期评估。

## (2) 长安大学

长安大学在沥青材料性能提升领域已进行了多年的跟踪研究与应用，积累了扎实的水泥基材料研究基础及工程实践经验，并组建了一支实力强大的沥青材料研发和设计人才团队，为本项目的顺利实施奠定了基础。长安大学现有实验室面积 1 万 2 千平方米，拥有国际一流的大型精密仪器 167 台套，设备总值 5000 余万元，其中包括大型平台试验设备：大型加速加载试验系统 HVSMARK VI、小型加速加载试验系统 MMLS3、MTS（2 台）、汉堡试验机、SHRP 全套设备（包括动态剪切流变仪 DSR、旋转压实仪 SGC 等）和差热分析系统等，为本项目的顺利进行提供了设备和实验基础。多年来，长安大学一直致力于沥青路面结构与材料方面的研究，且取得了丰富的研究成果，为我国公路建设事业的可持续发展做出了巨大贡献。学院科研实力雄厚。近五年来，先后获得国家、省部级科技奖励 150 余项，近十年连续获得国家科技进步奖共计 13 项，多项科研成果达到国际或国内领先水平，填补了诸多领域的空白。近年来学院先后承担完成了国家科技支撑计划项目、国家科技攻关项目、国家自然科学基金资助项目、国家西部交通建设项目等重大科研项目百余项。学院充分发挥科技与人才优势，紧密围绕国家经济建设主战场，为国民经济和我国公路交通事业做出了突出贡献。科学研究成果极大地推动了交通事业的发展，产生了巨大的社会效益。

## 3. 参考文献

[1] 黄晓明, 赵永利. 沥青路面再生利用理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2014.

- [2] Farooq M A, Mir M S, Sharma A. Laboratory study on use of RAP in WMA pavements using rejuvenator[J]. *Construction & Building Materials*, 2018, 168(APR.20):61–72.]
- [3] West R, Willis J R, Marasteanu M. Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content. 2013.
- [4] Ming T Z, Zhuang Y, Hu G W. The Influence of Recycling Agents on the Performance of Regenerated Asphalt[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014, 448-453:665-668.
- [5] Elkashef M, Williams R C. Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator[J]. *Construction and Building materials*, 2017, 151: 345-352.
- [6] Loria, Luis, Hajj, et al. Performance Evaluation of Asphalt Mixtures with High Recycled Asphalt Pavement Content[J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2011.
- [7] Karlsson R, Isacson U, Ekblad J. Rheological characterisation of bitumen diffusion[J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42(1):101-108.
- [8] Guo M, Liu H, Y Jiao, et al. Effect of WMA-RAP technology on pavement performance of asphalt mixture: A state-of-the-art review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 266.
- [9] Laboratory evaluation of stiffness, low-temperature cracking, rutting, moisture damage, and fatigue performance of WMA mixes[J]. *Road Materials & Pavement Design*, 2015, 16(2):334-357.
- [10] Wang W, Chen J, Sun Y, et al. Laboratory performance analysis of high percentage artificial RAP binder with WMA additives[J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 147(aug.30):58-65.
- [11] CapitO S D, Picado-Santos L G, Martinho F. Pavement engineering materials: Review on the use of warm-mix asphalt[J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 36(none):1016-1024.

- [12] TRB Engineering Properties, Emissions, and Field Performance of Warm Mix Asphalt Technologies [R]. WashionDC: TRB,2008.
- [13] Beilage J G. BAST-LCPC-Workshop "Strassenverkehrslaerm" beim Laboratoire Regional des Ponts et Chaussees (LRPC) in Strasseburg (7./8. Dezember 2000)[J]. 2001.
- [14] G Valdés, F Pérez-Jiménez, R Miró, et al. Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP)[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(3):1289-1297.
- [15] 耿磊.基于旧料再生的高模量沥青混合料研究[D].东南大学, 2013.
- [16] Mo S, Wang Y, Xiong F, et al. Changes of asphalt fumes in hot-mix asphalt pavement recycling[J]. Journal of Cleaner Production, 258.
- [17] 李中华,徐世法,吴胜江,等.抑烟除味剂对 SMA-13 沥青混合料路用性能影响评价[J].石油沥青, 2020(1):7-10.
- [18] 黄刚,何兆益,周超,等.膨胀石墨抑制沥青烟机理与抑烟沥青混合料动态性能[J].中国公路学报, 2015, 28(10).
- [19] 黄刚,何兆益,黄涛.高温状态沥青烟释放室内测定与影响因素分析[J].建筑材料学报, 2015(02):322-327.
- [20] 王朝辉,李彦伟,李蕊, et al.低碳多功能电气石改性沥青制备及性能研究[J].中国公路学报, 2013, 26(5):34-41.
- [21] Aurangzeb Q, Al-Qadi I L, Ozer H, et al. Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content[J]. Resources Conservation and Recycling, 2014, 83:77-86.
- [22] Chowdhury R, D Apul, Fry T. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction[J]. Resources Conservation & Recycling, 2010, 54(4):250-255.
- [23] Chen X, Wang H. Life cycle assessment of asphalt pavement recycling for greenhouse gas emission with temporal aspect[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 187(JUN.20):148-157.

### 三、实施方案

#### 1. 拟解决的关键问题

(1) 完成 RAP 掺量大于 50%的高模量再生沥青混合料技术体系。

借助老化沥青变硬的特点进行以高模量为性能方向的再生设计研究，研究 RAP 料的结团特征以及使用前的预处理方式。拟通过集料的级配优选，提高再生混合料的性能，并且研究 RAP 掺量对高模量再生沥青混合料压实特性及路用性能的影响，为大比例掺量的旧料再生提供一种有效方法。

(2) 再生沥青混合料路面结构适用性研究。

基于路面结构的力学响应，通过力学模拟软件对高模量再生沥青混合料应用层位进行研究。针对本省不同 RAP 料情况以及地理气候等不同，推荐再生沥青混合料合理的使用层位，提升废旧材料再生利用空间和价值；

(3) 采用寿命周期评价（LCA）方法，定量评价各再生循环利用技术综合效益。

从原材料生产过程、运输过程、路面工作过程、路面材料处理过程等四个方面对节能减排及循环利用效益进行分析，构建公路养护节能减排评价体系。同时沥青路面再生循环利用技术在高等级公路中推广应用，结合重点示范推广工程，进行后期的长期性能观测评估。

#### 2. 主要研究内容及实施方案

##### 2.1 主要研究内容

(1) 高模量再生沥青混合料级配优选

- ① 研究不同级配对高模量再生沥青混合料性能影响；
- ② 优选出适合的级配。

(2) 高模量再生沥青混合料关键技术研究

- ① 研究高模量再生沥青基础性能规律，从而完善制备高模量再生沥青的最佳方案；
  - ② 研究 RAP 料的预处理方式；
  - ③ 研究 RAP 掺量对高模量再生沥青混合料压实特性及路用性能的影响。
- (3) 基于力学响应的高模量再生沥青混合料路面结构适用性研究

- ① 对高模量再生沥青混合料进行仿真与应用的研究；
- ② 推荐高模量再生沥青混合料的合理使用层位；
- ③ 提出高模量再生沥青混合料不同应用层位下的关键技术及控制措施。

(4) 示范工程应用及节能减排和循环利用效益评估研究

- ① 建立节能减排和循环利用的评价指标；
- ② 将技术在实际应用中推广并进行后期的长期性能观测评估；
- ③ 节能减排和循环利用效果整体评估。

## 2.2 实施方案

### (1) 高模量再生沥青混合料级配优选

根据法国高模量沥青混合料设计思路，依据再生混合料的综合性能优选级配。

1) 首先根据 RAP 集料筛分级配的变异性初步分为两档，记为 A 档旧料与 B 档旧料。之后初步测定各档级配，与新料正交组配，以级配中值为限，设计粗级配、细级配以及中级配。根据各档级配制备多组混合集料，并且通过抽提筛分，去除变异突兀数据，平均各级配类型筛分结果，绘制筛分曲线。具体方案可见下表 1。

表 1 具体集料级配组合方案

方案	级配集料组合
方案一	A 档旧料+B 档旧料+新料
方案二	A 档旧料+新料
方案三	B 档旧料+新料

注：上述 A、B 档旧料为根据 RAP 集料筛分级配的变异性初步筛分所得。

2) 根据得到的筛分曲线，通过质量通过百分率、分级筛余量以及累计筛余量反算出由“单粒径”集料制备的各类型级配的高模量混合料，并通过高模量沥青混合料的路用性能初步选定较优级配类型。通过上述方法可以减少高模量再生沥青混合料中级配的变异性，将高模量再生沥青混合料中筛分级配转化为高模量沥青混合料中级配，从而更加清楚了解各种级配的路用性能。

### (2) 高模量再生沥青混合料关键技术研究



将大 RAP 掺量再生技术与法国高模量沥青混合料技术有机结合，研究探索硬质的旧沥青路面固废材料用于制备功能型高模量沥青混合料的可行性；

1) 通过文献调研分析 RAP 的变异性原理及其主要因素。初步拟定 RAP 结合料性能和 RAP 结团特征为 RAP 变异性主要研究对象。对于 RAP 结团特征，通过随机取样，以破碎试验及 AIMS 扫描试验为基础，对旧料的结团颗粒组成、结团程度、破碎规律等进行分析，并提出破碎率指标等 RAP 结团评价指标，提出相应的旧料结团应对措施。此外，对于 RAP 结合料性能，通过对其抽提、筛分，采用针入度、延度、软化点及 DSR 流变试验对 RAP 主要组成材料旧沥青性能进行评价。基于数理统计方法中变异系数 COV 定量表征 RAP 中的变异性。同时，通过聚类分析法，考虑类似材料特性，分析不同特性 RAP 归类的聚类因子 K 值，据此将 RAP 来源进行归类，通过 RAP 的储存管理降低了 RAP 的变异性。在此基础上，通过高速剪切设备制备含不同变异特性 RAP 结合料的高模量再生沥青（再生沥青+普通沥青、高模量剂、硬质沥青），并测定其车辙因子、蠕变速率、疲劳因子等，以此对高模量再生沥青结合料的高温性能、低温性能和抗疲劳性能进行综合评价分析，并基于数理统计对其不同性能变异性进行表征，提出 RAP 老化胶结料的变异特性的控制指标。基于灰关联分析，构建影响因素和影响水平的灰关联分析模型，确定对高模量再生沥青性能影响最密切的 RAP 结合料变异性因素，并对此变异因素提出具体的控制措施。此外采用现代材料研究手段（分层抽提技术、凝胶渗透色谱、原子力显微镜等）表征再生沥青混合料中沥青胶浆新旧沥青混合状态及混合程度。基于微观研究手段（红外光谱、扫描电镜等）对高 RAP 回收沥青掺量再生沥青结合料的微观特性进行分析，揭示其再生机理。

2) 在上述研究的基础上，借助老化沥青变硬的特点进行以高模量为性能方向的再生设计研究。基于法国高模量沥青混合料设计方法，进行配合比设计，同时，通过筛分试验分析不同筛孔下 RAP 料的变异性，并以变异性较大的筛孔关键控制筛孔。根据关键筛孔对 RAP 进行分档，将不同档 RAP 料和新料进行复配合成基准配合比。通过 SGC 旋转压实成型方式研究控制变异水平的 RAP 预处理方式（预破碎、预加热），RAP 掺量（大于 50%）及添加剂对高模量再生沥青混合料压实特性、水稳定性，高温性能，抗疲劳性能，低温性能以及劲度模量的影响，

从而确定出RAP料的掺量，为大比例掺量的旧料再生提供一套较为完整的设计体系。

### （3）基于力学响应的再生沥青混合料路面结构适用性研究

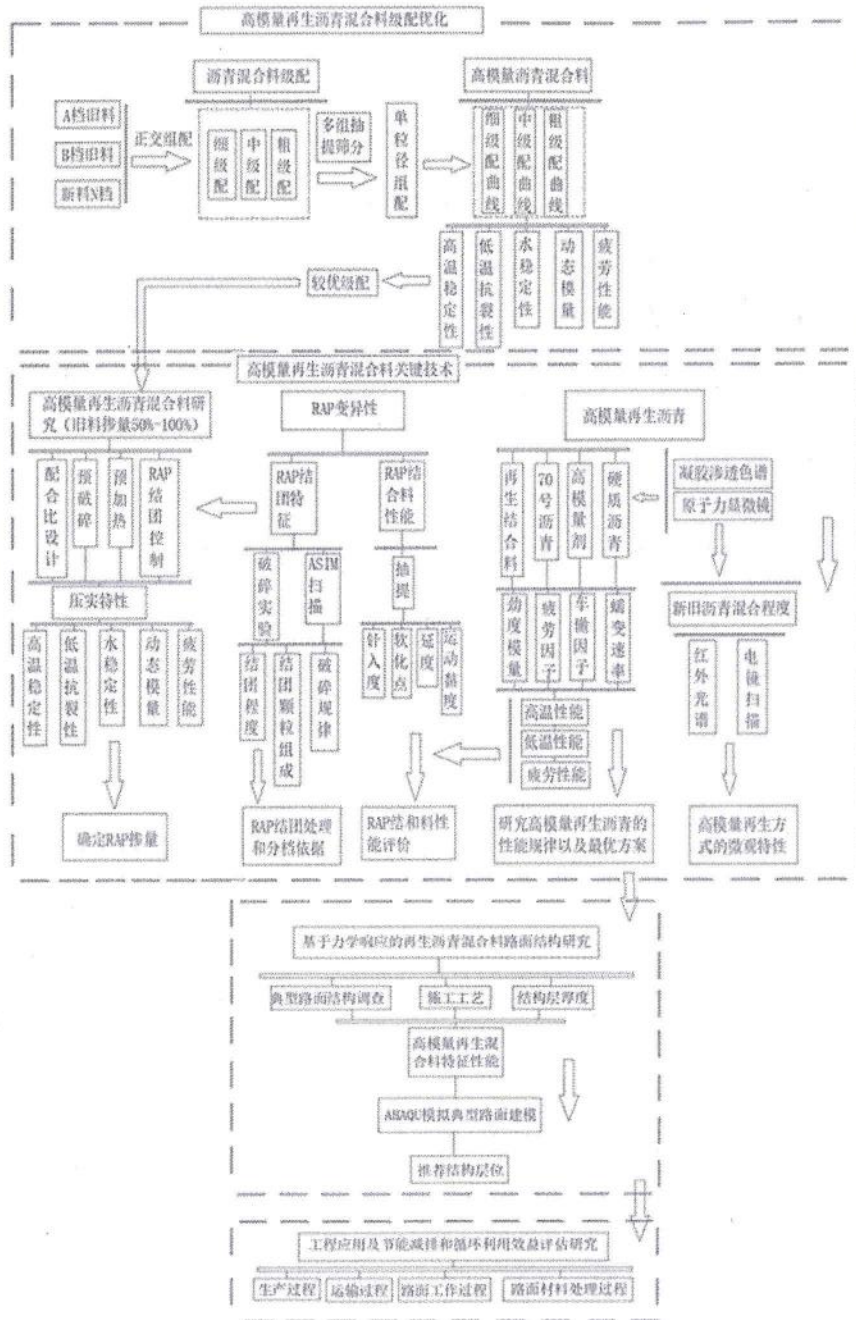
对高性能再生沥青混合料应用层位提高可行性进行研究，提升废旧材料再生利用空间和价值：

在详细调查陕西省再生路面结构与材料的基础上，借助 ABAQUS 有限元分析软件建立典型的路面结构组合模型，结合再生层路面结构设计指标，分析高模量再生沥青混合料应用层位、结构层厚度、荷载以及施工工艺等因素对路面结构拉应力和拉应变等力学响应的影响，优化再生沥青混合料路面机构组合，推荐再生沥青混合料的合理使用层。提出再生沥青混合料不同应用层位下的关键技术及控制措施。

### （4）示范工程应用及节能减排和循环利用效益评估研究

在前述研究基础上，建立节能减排和循环利用的评价指标，从原材料生产过程、运输过程、路面工作过程、路面材料处理过程等四个方面对节能减排及循环利用效益进行分析，构建高等级公路养护节能减排评价体系。根据上述集成成果和研究成果，将沥青路面再生循环利用技术在高等级公路中推广应用，结合重点示范推广工程，进行后期的长期性能观测评估，探讨对不同使用条件的适应性。同时，对近年来已推广应用的再生技术进行分析总结，对所取得的节能减排和循环利用效果进行整体评估。

### 2.3 技术路线



### 3. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本课题研究的理论和技术难度较高，研究内容牵涉面广、系统复杂，需要进行实验的工作量大，初步确定项目研究期限为 24 个月，自 2024 年 1 月开始，至 2025 年 12 月结束；基本建设计划的衔接如下：

(1) 2024.01.01-2024.03.31: 分析国内外沥青路面节能减排和循环利用养护技术及材料的发展现状, 重点调研养护技术的节能减排评价体系;

(2) 2024.04.01-2024.08.31: 借助新旧料的正交组配、设计三种级配类型, 通过抽提筛分, 用新料拟配三种级配的混合料研究级配对高模量再生沥青混合料性能影响, 通过高模量再生沥青混合料的路用性能初步拟选较优级配;

(3) 2024.09.01-2025.04.30: 借助老化沥青变硬的特点进行以高模量为性能方向的再生设计研究, 研究 RAP 预处理方式, RAP 掺量对高模量再生沥青混合料压实特性及路用性能的影响, 为大比例掺量的旧料再生提供一种有效方法;

(4) 2025.05.01-2025.09.30: 借助 ABAQUS 有限元分析软件分析超高比例再生沥青混合料及早强型冷再生混合料应用层位、结构层厚度、再生料回弹模量、荷载以及施工工艺等因素对路面结构拉应力和拉应变等力学响应的影响, 优化再生沥青混合料路面机构组合, 推荐再生沥青混合料的合理使用层位, 提出不同使用层位下的关键技术及控制措施;

(5) 2025.10.01-2025.12.31: 从原材料生产过程、运输过程、路面工作过程、路面材料处理过程等四个方面对节能减排及循环利用效益进行分析, 构建公路养护节能减排评价体系。同时沥青路面再生循环利用技术在高等级公路中推广应用, 结合重点示范推广工程, 进行后期的长期性能观测评估; 最后组织最终成果评审, 并根据专家意见修改并完善相关各类文件, 配合业主单位结题验收。

#### 4. 有关技术经济指标

在公路废旧材料循环利用综合技术研究中, 通过将废旧沥青混合料高价值再生, 用于高模量再生沥青混合料中, 从而节约道路沥青、集料等不可再生资源, 实现路面废旧材料的高效再生利用。主要技术经济指标如下:

(1) 实现铣刨料高效利用, 铣刨料掺量 $\geq 50\%$ ;

(2) 在满足路用性要求的情况下, 预计节约工程材料成本 20%以上, 减少路面能耗和排放 15%以上。

### 四、项目承担单位及参加单位概况

#### 1. 单位概况

(1) 项目承担单位: 陕西交通控股集团有限公司白泉分公司

陕西交控集团成立于 2021 年 1 月 30 日，是由陕西省政府出资设立的国有独资公司，为省属大型国有企业，由省政府授权省国资委履行出资人职责，省交通运输厅负责行业管理和业务指导。陕西交通控股集团有限公司白泉分公司成立于 2021 年 06 月 04 日，属陕西交控集团下级公司，注册地位于陕西省安康市汉滨区建民办事处安康收费站。经营范围包括一般项目：园林绿化工程施工；普通机械设备安装服务；公路水运工程试验检测服务；规划设计管理；信息咨询服务（不含许可类信息咨询服务）；新材料技术研发；国内贸易代理；供应链管理服务；以自有资金从事投资活动；工程管理服务；土石方工程施工；工程技术服务（规划管理、勘察、设计、监理除外）；工程和技术研究和试验发展；地质勘查技术服务。许可项目：公路管理与养护；地质灾害治理工程施工；建设工程监理；公路工程监理；建设工程勘察；住宿服务；餐饮服务；房地产开发经营；建设工程质量检测；各类工程建设活动；建筑智能化工程施工；房屋建筑和市政基础设施项目工程总承包。

陕西交通控股集团有限公司白泉分公司成立于 2021 年 6 月，前身为成立于 2010 年 12 月的原陕西省高速公路建设集团公司，承担十天高速公路（G7011）陕鄂界（白河）至安康汉中界（茶镇）段 208.872 公里高速公路运营管理工作，分公司内设 8 个部门，下辖 4 个管理所，12 个收费站和 1 个安康治超站，现有员工共计 468 人。白泉分公司管养 208.872 公里高速公路，全线为沥青混凝土路面。其中安康西段于 2010 年 12 月 26 日建成通车，安康东段于 2011 年 12 月 27 日建成通车。路线全段采用双向四车道高速公路标准建设，其中管养高速路段中 K188+500-K207+740 段为双向六车道。现有养护管理人员 21 名，平均年龄 35 岁，其中硕士学历 2 人，本科学历 15 人，先后获得“全国交通运输文化建设优秀单位”、“全国青年安全示范岗”、“省级文明单位”等厅级及以上荣誉 80 余项，2023 年 1 月顺利通过“陕西省高速公路运营标准化试点”终期评估。

## （2）项目参与单位：长安大学

长安大学是教育部和交通部共建的“211 工程”重点建设大学，是国家“985 工程”优势学科创新平台建设高校。学校有 2 个国家工程实验室，7 个教育部重点实验室和工程研究中心，12 个交通运输部、国土资源部、住房和城乡建设部、陕西省重点实验室和工程技术研究中心，2 个陕西省人文社会科学重点研究基

地。拥有全国高校唯一的汽车综合试验场。其中公路学院和材料科学与工程学院在道路结构与材料方面取得了突出的成就，先后承担了国家科技攻关计划项目、国家自然科学基金项目、国家西部交通建设科技项目以及省部委重大科技项目，已成为国家西部交通建设科技项目的主力军，是国内从事公路交通运输学科知名权威高校，具备突出的科研能力，能够确保该课题顺利且保质保量完成。

此外，长安大学在沥青材料性能提升领域已进行了多年的跟踪研究与应用，积累了扎实的水泥基材料研究基础及工程实践经验，并组建了一支实力强大的沥青材料研发和设计人才团队，为本项目的顺利实施奠定了基础。长安大学现有实验室面积 1 万 2 千平方米，拥有国际一流的大型精密仪器 167 台套，设备总值 5000 余万元，其中包括大型平台试验设备：大型加速加载试验系统 HVSMark VI、小型加速加载试验系统 MMLS3、MTS（2 台）、汉堡试验机、SHRP 全套设备（包括动态剪切流变仪 DSR、旋转压实仪 SGC 等）和差热分析系统等，为本项目的顺利进行提供了设备和实验基础。近年来公路学院先后承担完成了国家科技支撑计划项目、国家科技攻关项目、国家自然科学基金资助项目、国家西部交通建设项目等重大科研项目百余项。学院充分发挥科技与人才优势，紧密围绕国家经济建设主战场，为国民经济和我国公路交通事业做出了突出贡献。科学研究成果极大地推动了交通事业的发展，产生了巨大的社会效益。

在本项目研究中，长安大学主要负责总体技术与理论把关，参与制定相关试验研究方案和技术研究路线；开展混合料组成材料优化、室内外试验及路用性能对比研究。

## 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
庞江波	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1980-10-21	副高级	道路工程（路面）	项目负责人
陈玉	长安大学	男	1981-11-23	正高级	道路工程（路面）	技术负责人

井龙飞	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1988-07-13	中级	道路工程 (路面)	技术方案负责人
刘玉	长安大学	男	1979-08-13	正高级	道路工程 (路面)	技术方案负责人
车玲利	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1984-04-08	中级	道路工程 (路面)	室内试验、现场监测
张冬冬	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1985-11-27	中级	道路工程 (路面)	室内试验、现场监测
李黎	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1987-05-02	中级	道路工程 (路面)	室内试验、现场监测
王岩	陕西交通控股集团有限公司白泉分公司	男	1992-11-23	中级	桥梁工程	室内试验、现场监测
徐宁	长安大学	男	1993-07-21	中级	道路工程 (路面)	室内试验、现场监测
胡家俊	长安大学	男	1997-03-10	中级	道路工程 (路面)	室内试验、现场监测
焦虎	长安大学	男	1998-08-13	中级	道路工程 (路面)	参与人员、室内试验

### 3. 各自承担的主要工作

在本次工程项目中，陕西交通控股集团有限公司白泉分公司主要负责试验路的铺筑以及具体的现场施工组织调配，为现场试验提供较为完善的条件。长安大学主要负责总体技术与理论把关，参与制定相关试验研究方案和技术研究路线；开展混合料组成材料优化、室内外试验及路用性能对比研究。

### 4. 项目主要负责人情况

庞江波，男，1980.10 生，中共党员，高级工程师，工学硕士。现任陕西交控白泉分公司路产养护部部长。长期从事高速公路建设、养护工作。在本次项目中负责总体的技术及施工把控。

## 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

陕西交通控股集团有限公司白泉分公司成立于 2021 年 6 月，前身为成立于 2010 年 12 月的原陕西省高速公路建设集团公司，承担十天高速公路（G7011）陕鄂界（白河）至安康汉中界（茶镇）段 208.872 公里高速公路运营管理工作，分公司内设 8 个部门，下辖 4 个管理所，12 个收费站和 1 个安康治超站，现有员工共计 468 人。本课题依托工程为陕西交通控股集团有限公司白泉分公司 2024 年路面养护工程。具体的路段为：十天高速公路（G7011）白泉段（陕西白河陕鄂界至汉中茶镇），全长 208.872 公里。沥青路面养护过程中，存在旧料掺量掺料较低，再生沥青混合料低温性能和水稳定性在添加再生剂的传统再生方式恢复效果较差等问题。这些均为现有再生技术存在一定的缺陷所带来的问题。

### 2. 投资来源

本项目资金共 59.877 万元，其中省交通厅对本项目资助 19.877 万元，剩余 40 万元为本公司养护项目资金配套。

### 3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目结合厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术，从混合料级配优化、RAP 变异性研究、力学分析等几方面着手，研发出性能优异且 RAP 掺量高的高模量沥青混合料，提出高掺量 RAP 的设计方法、适宜的施工工艺等技术形成与我省气候交通状况相适应的厂拌热再生高模量沥青混合料成套理论与技术，提高我省道路的厂拌热再生技术质量，降低路面建造的技术成本，解决我省大量破旧公路铣刨料的处理问题，为我省公路建设储备雄厚的技术资源、人才资源、并增强我省的可持续性发展。通过依托工程的实施，一方面对室内理论研究成果进行了验证，另一方面也促进了 RAP 掺量水平的提高。

### 4. 组织管理形式

组建本课题负责团队，具体执行可行性研究的各项任务。团队成员由陕西交通控股集团有限公司白泉分公司与长安大学公路学院项目参与者共同组成。



## 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	19.877	合 计	59.877		
工程配套研究经	40.0	1.设备费			
单位自筹	0.0	（1）购置设备费	0.0		
其他经费	0.0	（2）设备改造与租赁费	2.047		
		2.业务费			
		（1）材料费	13.8		
		（2）测试化验实验加工费	10.53		
		（3）燃料动力费	0.0		
		（4）差旅费/会议费/国际合作 与交流费	4.0		
		（5）出版/文献/信息传播/知识 产权事费	8.0		
		（6）其他费用	0.0		
		3.劳务费			
		（1）专家咨询费	5.0		
		（2）聘用人员劳务费	3.0		
		（3）其他劳务费	0.0		
		（二）间接费用			
		1.管理费	10.0		
		2.绩效支出	3.5		

## 七、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

### 1. 项目预期目标（项目的考核目标）

本课题拟通过对废旧材料和再生技术的调研，系统总结已有再生循环利用技术应用体系。此外，通过集料级配优选，将大掺量再生技术与法国高模量沥青混合料 EME 技术有机结合，研究探索硬质的旧沥青路面固废材料用于制备功能型高模量沥青混合料的可行性；同时，对高性能再生沥青混合料应用层位提高可行性进行研究，提升废旧材料再生利用空间和价值；在此基础上，基于寿命周期评价方法，评价各再生技术的节能减排和资源循环利用综合效益。具体目标如下：

- （1）实现铣刨料高效利用，铣刨料掺量 $\geq 50\%$ ；
- （2）优化再生混合料低温和疲劳性能评价方法，建立相应的性能指标体系；
- （3）基于 RAP 掺量及关键指标推荐再生沥青混合料最佳路面结构应用层位，提出再生沥青混合料不同应用层位下的关键技术及控制措施。

### 2. 提交的研究成果及其形式

- （1）厂拌热再生高模量沥青混合料课题研究报告；
- （2）《公路废旧材料循环利用指导手册》；
- （3）优化再生沥青混合料低温和疲劳性能评价方法，建立相应的性能指标体系；
- （4）发表论文 2 篇，申请专利 1 项；
- （5）培养研究生 3 名，培养相关技术人员 2 名。

### 3. 经济、社会、环境效益分析

#### （1）经济效益

再生沥青混合料通过回收旧的沥青路面，减少了对新沥青和骨料的需求，降低了原材料的采购成本。此外，使用 RAP 可以显著减少旧路面材料的废弃处理费用，这不仅节省了废弃物运输和处理的成本，还减少了填埋场的使用量。

#### （2）社会效益

推广和使用再生沥青混合料有助于塑造环保和可持续发展的社会形象，增强公众的环保意识和社会责任感。

#### （3）环境效益

生产新沥青和骨料的过程会产生大量的二氧化碳，通过使用再生材料，可以减少碳排放，减轻对环境的负担。此外，再生沥青混合料有效利用了废弃的旧沥青路面材料，减少了废弃物的产生，有助于环境保护。

#### 八、其它需要说明的问题

无

#### 九、申请单位意见



单位负责人：

年 月 日

## 可行性研究报告评审意见

2024年8月27日，受陕西省交通运输厅委托，陕西省公路局在西安主持召开了“厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用”（项目编号：24-85K）项目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、项目针对沥青路面再生技术现状，开展厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用，对提高废旧沥青混合料资源化利用具有重要意义，立项必要。


二、研究内容全面，研究目标明确，技术路线基本可行。

三、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，经费预算合理，具备开展研究工作的条件。

建议：

聚焦研究内容，优化技术路线，进一步明确技术指标。

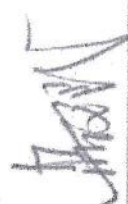




主任委员：



2024年8月27日

厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用(项目编号: 24-85K)

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	公路工程	公路工程	正高工	
2	委员	曹可勇	陕西省公路学会	公路工程	公路工程	正高工	
3	委员	景宏君	西安科技大学	公路工程	公路工程	教授	
4	委员	罗强	西南交通大学	道路与铁道工程	道路与铁道工程	教授	
5	委员	路凯冀	中路高科(北京)公路技术有限公司	公路工程	公路工程	研究员	

## 专家审查意见表

项目名称	厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用				
专家姓名	边世斌	职务/职称	正高级工程师	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

一、针对沥青路面再生技术现状，开展厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用，对提高废旧沥青混合料的利用率，实现资源利用节约化具有重要意义，立项必要。

二、研究内容

1. 原材料的筛选与预处理；
2. 混合料的配比设计；
3. 热再生技术的实施过程；
4. 高模量沥青混合料的性能评价。

三、技术路线

原材料的准备-混合料的制备-性能的检测与评价

四、关键技术

1. 原材料的分析和研究；
2. 混合料的配比设计；
3. 热再生技术研究；
4. 高模量沥青混合料性能评价。

五、关键技术

热再生剂配方和工艺流程；  
高模量沥青混合料的配比设计。

六、建议：

- (1) 探索不同气候、地理条件下热再生技术的适用性。
- (2) 优化混合料的配比设计技术，提高混合料的综合性能。

评审专家（签字）：



2014年8月27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	厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用				
专家姓名	甘霖	职务/职称	E22	专业	道路工程
专家单位	陕西师范大学			联系电话	13809198820

#### 评审意见

项目针对废旧沥青路面材料(RAP)再生利用现状,开展厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用,对RAP材料循环利用、降低养护成本,具有显著的经济社会效益,立项必要。

建议: 1. 整合研究内容,突出RAP与高模量再生混合料性能提升研究;  
 2. 仅靠掺入高模量剂不足以支撑项目的创新性,应从配合比的改进和力学性能的提升方面进行技术突破。

评审专家(签字): 

2024年8月27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	厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用				
专家姓名	景宏君	职务/职称	教授	专业	公路工程
专家单位	西安科技大学			联系电话	13629701111

#### 评审意见

再生沥青混合料技术研究近年有较多研究。本项目基于相关研究现状，开展厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与示范。立项必要，经费合理。试验设备及检测工作均已落实。具备开展研究工作的条件。同意开题，建议如下：

1. 本项目研究内容与现有成果的差异？有何创新之处？
2. 聚焦研究内容，明确技术指标；
3. 大掺量、高模量沥青混合料，与沥青及沥青混合料的区别，应予以说明；
4. 经济、社会及环境综合效益应予以分析。

评审专家（签字）：景宏君

2024年8月27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	厂拌热再生高模量沥青混合料可行性研究报告				
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	1390823860


### 评审意见

我国沥青路面的再生利用技术在工程应用中面临掺量限制、性能恢复不足等难题，尤其在高等级道路或重要结构层的使用面临诸多挑战。将高模量沥青混合料与再生技术结合，实现高温性能稳定、低温抗裂性能提高和疲劳寿命延长的道路材料解决方案，对提高公路建设的可持续发展意义重大。立项必要。

回收沥青路面材料掺量增加，混合料的高温性能有所提高，但低温性能和水稳定性下降；如何通过添加再生剂，找到一个平衡点，成为一个重要的研究难点。为此，课题拟开展的主要研究内容包括：1) 高模量再生沥青混合料级配优选；2) 高模量再生沥青混合料关键技术研究；3) 基于力学响应的再生沥青混合料路面结构适用性研究；4) 示范工程应用及节能减排和循环利用效益评估研究。其中，大掺量高模量再生沥青混合料技术体系、再生沥青混合料路面结构适用性、再生循环利用综合效益定量评价等，是课题研究的关键技术。

课题组具备良好研究基础和实验条件，对经济和社会效益的分析较为全面。项目承担及参加单位有相关技术研发能力，人员构成分工合理；项目依托工程及经费筹措情况落实；项目考核目标明确，拟提出的研究成果形式有技术报告、专利论文、评价方法、技术体系等，经济社会环境效益兼具。同意立项。


建议：高模量再生混合料的设计需考虑高掺量的性能变异增加问题，确保路用性能符合要求。

评审专家（签字）：

2024年08月27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	厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用				
专家姓名	路凯冀	职务/职称	研究员	专业	公路工程
专家单位	中路高科（北京）公路技术有限公司			联系电话	13910518417
<b>评 审 意 见</b>					
<p>1、本研究要进一步聚焦应用高模量沥青混合料技术、路面再生料给混合料带来的低温性能不足、抗裂性能不足问题，通过研究提出相应改善措施。弱化基于力学响应的再生沥青混合料路面结构适用性研究的内容。</p> <p>2、强化材料组成设计方法的研究，明确不同高模量技术路线、不同性能 RAP 料的材料组成设计要点与流程。</p>					
<p>评审专家（签字）：</p> <p>2024 年 8 月 27 日</p> <p>（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）</p>					

## 专家意见处理表

项目名称：厂拌热再生高模量沥青混合料关键技术研究与应用

(项目编号：24-85K)

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) 探索不同气候、地理条件下热再生技术的适用性。 (2) 优化混合料的配比设计技术, 提高混合料的综合性能。	本课题研究拟先对陕西省高速公路所处气候和地理环境进行再生的针对研究, 根据该地区特点优化混合料的配合比设计, 后再逐步考虑应用到其他地区。
2	曹可勇	整合研究内容, 突出 RAP 高掺量再生混合料性能提升研究。仅掺入高模量剂不足以支撑项目创新性, 应以配合比的改进和力学性能的提升方面进行突破。	对 RAP 高掺量再生混合料性能进行深入研究, 此外结合力学模拟以及寿命周期的理念对道路性能及层位推荐进行深入研究。
3	景宏君	(1) 聚焦研究内容, 明确技术指标。 (2) 经济、社会及环境保护效益应明确算法。	对研究内容及技术指标进行深入的聚焦及明确, 并参考寿命周期的计算方法对效益算法进行优化。
4	罗强	高模量再生混合料的设计需考虑高掺量的性能变异增加问题, 确保路用性能符合要求。	在项目研究思路中有关于对高掺量所带来的性能差异性研究并配套了应对解决办法, 在项目具体实施过程中会加大对这方面的关注确保路用性能符合要求。
5	路凯冀	强化材料组成设计方法研究, 明确不同高模量技术路线、不同性能 RAP 料的材料组成设计要点与流程。	根据专家意见, 对研究课题中不同高模量技术路线、不同性能 RAP 料的材料组成设计的要点以及流程进行补充并对其加大关注。

项目负责人 (签字):

