

项目合同编号：25-85K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料

研发与应用

承担单位：西安科技大学

项目负责人：李志刚

通讯邮编、地址：710054、陕西省西安市碑林区雁塔中路 58 号

传真、电话：18991397662

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：25-85K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料

研发与应用

承担单位：西安科技大学

项目负责人：李志刚

通讯邮编、地址：710054、陕西省西安市碑林区雁塔中路 58 号

传真、电话：18991397662

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) 基于模量匹配的沥青路面注浆修补结构动力响应有限元分析

通过有限元方法，建立注浆修补沥青路面结构数值模型，分析注浆材料与半刚性基础材料不同模量比条件下，路面结构在荷载作用下的动态响应规律，探讨模量差异对结构受力状态的影响机制。结合不同路段半刚性基层中长期抗压强度与回弹模量的调研，综合确定适用于半刚性基层注浆修补的复合注浆材料刚度参数范围，为后续材料组成设计提供理论约束。

(2) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与性能验证

以高流动性、高粘结性和半刚性基层模量平衡为研发目标，采用无机/有机复配思路，通过掺加柔性胶粉等手段调节材料模量、提升韧性和粘结强度。通过正交试验与模糊优选理论，综合考虑流动性、粘结性、模量等关键指标，确定各组分最佳掺配比例，制备新型复合注浆材料，并对其力学性能、粘结性能、相容性及稳定性进行系统验证。

(3) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料多尺度交织作用机理研究

采用微观测试手段分析其水化进程、微观结构与组分交互作用，探究聚合物、水泥、乳化沥青等多相材料之间的交织机理、颗粒包裹状态及分布规律。结合宏观力学性能，开展宏微观多尺度对比分析，揭示复合注浆材料强度形成与性能演化的内在机制，为材料组成优化与性能调控提供理论支撑。

(4) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料评价方法及施工工艺研究

基于不同材料组成掺配比例对注浆材料力学性能与模量性能的影响规律，分析其强度、刚度及模量特征的变化趋势，探究复合注浆材料“脆性-韧性”转变机制。提出以模量平衡为核心的复合注浆材料合理的评价方法。针对沥青路面半刚性基层裂缝、脱空、松散等典型病害场景，通过现场试验与工程验证，系统总结注浆材料施工工艺及设备要求，明确注浆压力、布孔方式、孔距等关键控制参数，形成复合注浆工艺。

2. 技术关键

(1) 复合注浆材料研发与性能验证。结合正交试验与模糊优选理论，在可接受内调控注浆材料的最终模量，使其与半刚性基层模量相匹配，实现“模量平衡”；

(2) 复合注浆材料组分交织及界面强度形成机制。通过微观测试，揭示组分相互交织作用机理、颗粒包裹状态与分布、材料水化进程和强度形成机理，为工艺参数设定提供理论依据。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托安康市国省道大中修工程，在 G210、G316 等典型路段开展注浆试验段。依托工程需重点解决以下技术难点：一是验证新型复合注浆材料与原半刚性基层的模量匹配效果，解决现有材料因模量失衡导致的应力集中与二次破坏问题；二是确定适用于不同路况的施工工艺关键参数，如注浆压力、布孔方式等，确保材料性能在实体工程中有效实现，为后续推广应用提供可靠依据。

二、考核指标

1. 预期目标

- (1) 研发得到基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆；
- (2) 提出有效实现模量平衡的复合注浆材料合理评价方法；
- (3) 实现 2h 开放交通。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

- (1) 基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆；
- (2) 揭示聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料强度形成机理。

3. 经济和社会效益

本项目经济效益主要体现在直接成本节约与间接效益提升。经济效益方面，采用非开挖注浆技术可显著缩短工期，极大减少了交通中断带来的间接经济损失。同时，模量匹配修复有效避免因二次破坏导致的反复维修，延长路面使用寿命，从而降低整个生命周期养护成本。随着该技术在陕西省乃至全国公路养护市场推广应用，其高效、病害针对性的优势将显著提升市场竞争力，并产生显著的间接经济效益。

通过使用复合注浆材料，有效消除因修补不当导致的二次脱空与裂缝，大幅提升道路平整度与结构性安全，预计可有效降低因此类隐性病害引发的交通事故风险。推动注浆养护行业从“经验性修补”向“科学、针对性修复”升级，提升我省在该领域的技术水平与竞争力。成果的推广应用将直接服务于安康市国省干线养护工程，保障人民安全便捷出行，具有广泛而积极的社会影响。

项目所开展非开挖注浆材料与技术，紧扣“资源节约”与“降污减碳”两大主题。非开挖工艺避免了传统“开膛破肚”式维修产生的大量建筑垃圾与扬尘污染，能显著减少废料产生。研发复合注浆材料因模量平衡其修补耐久性得到提升，从而实现了资源节约。全寿命周期的节能减排效果显著，相比传统开挖重铺工艺，可显著降低能源消耗与碳排放，契合国家“双碳”战略，为构建绿色低碳的交通养护体系提供了关键技术支撑。

4. 成果提供形式

(1) 提交《基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用》研究报告；

(2) 提交《基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆技术施工指南》；

(3) 发表学术论文 1 篇；

(4) 申请专利 1 项。

5. 其他考核指标

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）
2026 年 第二季度	整理相关研究现状，完成项目的立项工作，准备试验所需材料和仪器，编写研究大纲和工作实施详细计划；通过调研无机结合料稳定基层、底基层的力学强度和刚度范围。
2026 年 第三季度	利用有限元分析，开展注浆修补后路面动态响应指标变化规律及模量差异对路面结构受力状况的影响；结合有限元分析和调研数据，综合确定注浆材料模量的可接受范围。
2026 年 第四季度	基于无机/有机复配思路，优选水泥、乳化沥青、聚合物胶粉等原材料；根据正交试验和模糊优选理论，综合优化注浆材料材料组成，实现新型复合注浆材料研发。
2027 年 第一季度	制备新型复合注浆材料，系统验证其力学性能、粘结性能、相容性及稳定性，并与传统水泥、高聚物注浆材料的开展性能对比试验。
2027 年 第二季度	采用 SEM、XRD、FTIR 等微观测试手段，分析复合注浆材料水化产物、微观结构及界面过渡区特征，探究聚合物、水泥、乳化沥青三相交织机理与颗粒分布规律。
2027 年 第三季度	开展宏微观多尺度对比分析，揭示强度形成与性能演化内在机制；探究不同材料组成注浆材料强度、刚度及模量特征的变化规律，提出复合注浆材料合理评价方法和评价指标。
2027 年 第四季度	通过试验路段现场总结分析注浆材料施工工艺及设备要求，明确注浆压力、布孔方式及孔距等关键控制参数。
2028 年 第一季度	整理相关研究资料，撰写项目研究报告，项目总结验收。

四、项目经费

项目总经费：	44.97 万元
交通运输厅补助：	19.97 万元
工程配套研究资金：	25.0 万元

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	39.97	19.97
1.设备费	0.0	0.0
(1) 购置设备费	0.0	0.0
(2) 试制设备费	0.0	0.0
(3) 设备改造与租赁费	0.0	0.0
2.业务费	36.97	19.97
(4) 材料支出	3.0	1.0
(5) 测试化验实验加工支出	22.0	13.5
(6) 燃料及动力支出	0.0	0.0
(7) 差旅支出	4.27	2.27
(8) 会议支出	0.0	0.0
(9) 国际合作与交流支出	0.0	0.0
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	5.0	2.0
(11) 其他支出	2.7	1.2
3.劳务费	3.0	0.0
(12) 劳务性支出	1.5	0.0
(13) 咨询专家支出	1.5	0.0
(二) 间接费用	5.0	0.0
4.管理费	2.2	0.0
5.绩效支出	2.8	0.0
合 计	44.97	19.97

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发〔2022〕3 号）文件执行。项目验收将组织财务专项验收或审计。

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）	1
		（1）授权发明专利	
		（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）	1
		（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
		（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	
	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
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（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
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	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	3
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	3
		3.培训从事技术创新服务人员（人	
		4.是否设立科研助理岗位	否
	产业化情况	1.开放共享仪器设备数（台/套/只	
		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			

六、承担单位或研究人员分工

1. 西安科技大学

- (1) 负责制定室内试验研究大纲和具体实施方案；
- (2) 负责室内外试验方案的制定与实施；
- (3) 参与注浆试验段的实施；
- (4) 负责项目研究报告的撰写；
- (5) 负责项目的验收。

2. 安康市公路局

- (1) 负责制定项目总体研究大纲和总体方案；
- (2) 负责注浆试验段的实施；
- (3) 参与项目的验收。

七、项目参加人员表

项目承担单位：西安科技大学						
参与单位（排序）：安康市公路局						
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
1	李志刚	西安科技大学	男	1988-04	副高级	道路工程（路面）
主要研究人员						
2	李寒松	安康市公路局	男	1974-07	副高级	道路工程（路面）
3	邓波	安康市公路局	男	1985-06	中级	道路工程（路面）
4	景宏君	西安科技大学	男	1974-09	正高级	道路工程（路面）
5	宋宁	安康市公路局	男	1970-05	副高级	道路工程（路基）
6	王洪专	安康市公路局	男	1978-06	中级	道路工程（路面）
7	邹晓龙	西安科技大学	男	1988-04	副高级	道路工程（路面）
8	赵桂娟	西安科技大学	男	1980-07	中级	道路工程（路基）
9	李建阁	西安科技大学	男	1991-10	中级	道路工程（路基）
10	刘马磊	西安科技大学	男	2003-10	技术员级	道路工程（路基）

八、信息表

项目合同编号		25-85K		密级	/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称		基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用									
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		44.97		厅 拨		19.97					
第一承担单位	单位名称	西安科技大学									
	所在地	陕西省（区、市）西安市					代码	610100			
	通讯地址	西安市雁塔路 58 号					邮编	710054			
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	10704			
参与单位	序号	单 位 名 称									
	1	西安科技大学									
	2	安康市公路局									
	3										
项目负责人		姓 名	李志刚		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1988			
		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	18991397662 029-85229545			电子邮箱		lizhigang@xust.edu.cn			
项目联系人		姓名	李志刚			性别		男			
		联系电话	18991397662 029-85229545			电子邮箱		lizhigang@xust.edu.cn			
项目组人数		10	高级	5	中级	4	初级		其他	1	
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 基于模量匹配的沥青路面注浆修补结构动力响应有限元分析 (2) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与性能验证 (3) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料多尺度交织作用机理研究 (4) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料评价方法及施工工艺研究									
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								

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.合同正本一式玖份，甲方单位伍份，承担单位肆份。

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：

陕西省交通运输厅

负责人：（签字）



2016年3月21日

联系人：（签字）

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）



单位负责人：（签字）



2016年3月21日

项目负责人：（签字）

（公章）

电 话：18991397662

财务负责人：（签字）



账 户 名：西安科技大学



开户银行：中国银行股份有限公司西安大雁塔北广场支行

账 号：102492014123

陕西交通科研项目科研诚信 承诺书

项目承担单位及项目负责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》的规定和科研项目合同约定，保证所提交材料的真实性，确保自筹经费全额到位、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：徐

项目负责人：

Jimmy

2026年3月27日

项目编号: 25-85K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青
复合注浆材料研发与应用

申请单位: 西安科技大学 (盖章)

联系人: 李志刚

电 话: 188991397662



陕西省交通运输厅制

2026 年 03 月

目 录

一、项目研究的背景和必要性.....	1
1.项目研究的背景、目的和概况.....	1
2.市场需求前景或推广应用领域.....	3
3.达到的技术水平及在国民经济发展中的作用	3
二、前期科研及工作基础.....	4
1.国内外研究现状和发展趋势	4
2.项目前期科研及现有工作条件	10
3.参考文献.....	14
三、实施方案.....	17
1.拟解决的关键问题.....	17
2.主要研究内容及实施方案.....	17
3.技术路线.....	20
4.后续技术改造或基本建设计划的衔接.....	23
5.有关技术经济指标.....	23
四、项目承担单位及参加单位概况.....	23
1.单位概况.....	23
2.技术力量及人员构成.....	25
3.各自承担的主要工作.....	26
4.项目主要负责人情况.....	26
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件.....	27
1.依托工程（工作）概况.....	27
2.投资来源.....	27
3.工程进度与项目科研进度的配合	27
4.组织管理形式.....	29
六、项目经费估算及资金筹措情况.....	30
七、项目绩效指标.....	31
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益.....	33
1.项目预期目标.....	33
2.提交的研究成果及其形式.....	33
3.经济、社会、环境效益分析.....	33
九、其它需要说明的问题.....	34
十、申请单位意见.....	34

一、项目研究的背景和必要性

1. 项目研究的背景、目的和概况

截至 2025 年末，全国高速公路里程超过 19 万公里，国省干线公路里程近 80 万公里。目前我国公路目前采用的路面形式主要为沥青路面，在实际服役过程中，由于受水、温等自然条件和交通荷载的反复作用，沥青路面形成各种损伤，不及时修补，随着路表水的浸入，在车辆动荷载和自由水的共同作用下，车辆驶过前后会在路面结构的孔隙或裂缝中形成泵吸作用，半刚性基层中的细集料在泵吸作用下形成的灰浆被抽离到道路表面形成泛浆现象，从而导致半刚性基层的冲刷脱空，对沥青路面造成更为严重的结构性破坏。其中，裂缝贯穿底基层及以下区域时，因不同结构层模量存在显著差异，病害发展速度更快，修补难度更大，已成为路面养护的重点难点问题。针对半刚性基层因温缩、干缩或结构受力形成的各类裂隙（如温度收缩裂缝、干燥收缩裂缝及结构裂缝等）开展精细化修补，是提升路面结构耐久性的关键。

非开挖注浆修补技术是指在不破坏原有路面的条件下，将注浆材料通过一定压力注入到沥青路面裂缝部位以提高其承载能力和耐久性能，起到路面结构加固补强作用。非开挖注浆与罩面处治、开挖重铺等其它传统沥青路面病害修复方式相比，具有工艺简单、成本低和开放交通快等特点，在道路加固与补强领域应用越来越广泛。

道路非开挖注浆效果受注浆材料、注浆设备和注浆工艺影响较大，其中，注浆材料的性能尤为重要。注浆加固修补效果是由注浆材

料和原破损路面共同决定的，但目前关于注浆修补材料的研究及工程应用中对注浆材料的关注点主要集中在注浆材料的工作性能、力学性能和耐久性能等方面，而忽略了注浆材料与原破损路面力学性能之间的力学相容性。目前常用的几种注浆材料在应用过程中存在以下几个问题：1) 地聚物注浆技术流动性、渗透性和强度高，具有较好的抗水冲刷能力，但其强度/刚度过高，与半刚性基层材料的强度、刚度差异巨大，导致补强部位应力集中，易出现二次破坏；2) 高聚物注浆材料的双组分材料混合后，体积迅速膨胀填充路面空洞位置，且聚氨酯材料属于真溶液，可以有效渗入微裂缝处，实现对基层脱空和裂缝位置的有效封堵。但聚氨酯泡沫固结体其强度/刚度很小，其模量同半刚性材料模量差异太大，易造成二次脱空，导致注浆后路面整体耐久性较差。模量作为工程材料的一个重要的力学性能参数，它反映了材料应力与应变之间的关系。倘若注浆材料与原破损路面材料之间存在模量差异，二者形成的复合材料在车辆荷载作用下可能会出现力学响应的差异，造成应力集中，从而形成注浆加固后的二次破坏。因此，研发与待补强沥青路面材料模量相匹配的裂缝注浆材料仍需进一步研究。

综上所述，本研究基于沥青路面半刚性修复注浆材料的模量与原路面结构相容性的影响，利用聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料模量可以调节的特点，以无机/有机复配形式达到模量匹配目标，并在无机材料体系中形成自身膜状网络结构，提高材料粘结强度，研发出一种新型沥青路面半刚性基层的注浆修补材料，采用理论分析与试验研

究相结合的方法对注浆修补材料性能、合理的材料组成、评价指标及施工工艺开展研究，为道路注浆修补材料的工程应用提供参考。

2. 市场需求前景或推广应用领域

本项目成果拥有广阔的市场前景。全国公路总里程已超过 550 万公里，其中国省干线公路近 80 万公里，巨大的存量路网已全面进入养护与提质增效的关键时期。非开挖注浆技术因其工艺简单、成本低、开放交通快等优点，已成为基层病害处治的首选技术之一。然而，现有注浆材料存在的力学不相容问题严重制约了修复效果的长期耐久性，市场对能够实现“模量匹配”、减少二次破坏的高性能注浆材料需求迫切。

本项目研发的复合注浆材料及配套施工工艺，核心处治对象为高速公路、国省干线、市政道路等工程中沥青路面出现的结构层脱空，半刚性基层裂缝、松散及强度衰减等病害；同时，产品研发完成后可拓展应用于水泥混凝土路面板底脱空注浆加固，进一步尝试处治因板底脱空病害。因此，本技术可广泛应用于各等级公路、市政公路加固基层病害养护，重点适用于交通繁忙、对修复效率和耐久性要求高的区域，如城市主干道、桥梁衔接段、秦巴山区国省干线、高速公路服务区及互通立交段等，应用场景广泛。

3. 达到的技术水平及在国民经济发展中的作用

本项目研究成果将突破现有注浆材料在设计与评价中忽视力学相容性的技术瓶颈，实现从追求单一高性能指标转为追求与原路面“模量平衡、协同工作”的精细设计的跨越。通过将模量平衡作为核心

控制指标，并采用聚合物水泥乳化沥青复合体系实现模量调整，研发针对沥青路面结构层脱空，半刚性基层松散及强度衰减等病害的注浆材料，最终将形成拥有新型材料配方、评价方法与施工工法。

通过项目实施能有效减少道路反复维修次数，节约大量的养护资金与建筑材料，降低因施工造成的交通延误与拥堵，提升物流效率，方便公众出行，具有显著的直接与间接经济效益；注重材料的耐久性与全周期成本，符合资源节约与环境保护的国策，为实现交通领域“双碳”目标提供有力的技术支撑；通过提供长效修复方案，显著延长道路使用寿命，降低全生命周期成本，保障交通“大动脉”的安全与畅通，为经济社会运行提供坚实基础支撑。

二、前期科研及工作基础

1. 国内外研究现状和发展趋势

目前注浆材料多采用地聚物注浆材料、水泥基注浆材料和高聚物注浆材料。地聚物注浆材料除了费用较高之外，其注浆效果易受待补强材料和温度的影响；水泥基注浆材料凝胶时间较长，不利于快速恢复交通；目前常用的高聚物类注浆材料是聚氨酯和环氧树脂，环氧树脂适用范围小，在道路养护方面仅适用于修复路面裂缝，而聚氨酯注浆材料适用于道路养护诸多场景，如路面重度裂缝、松散、脱空、沉陷，能够实现病害的快速处治，但是目前聚氨酯存在工程造价高、耐久性相对不足，有污染等问题。鉴于此，相关学者对水泥基注浆材料、聚合物注浆材料与复合注浆材料开展了研究。主要归结如下：

(1) 水泥基注浆材料研究现状

作为注浆技术的核心载体,水泥基注浆材料凭借其原料易得、成本低廉、力学性能稳定及环境适应性广等优势,成为工程实践中应用最广泛的注浆材料之一^[1]。然而随着我国“碳达峰、碳中和”战略目标的深入推进,以及复杂地质条件(如富水破碎岩体、高渗透压地层)对注浆材料性能要求的不断提高,传统水泥基注浆材料逐渐暴露出抗水分散性不足、扩散可控性差、环境负荷较高等瓶颈问题。如何通过材料设计与工艺优化,实现注浆材料“高性能化、绿色化、智能化”的协同发展,已成为学术界与工程界共同关注的核心议题。近年来,学者们围绕水泥基注浆材料的性能提升开展了系统性研究:在材料研制方面,通过引入纳米材料^[2-3]、功能聚合物^[4-5]及工业固废^[6]等组分,显著改善了浆液的流变特性与结石体强度;在扩散机制研究方面,基于黏度时变模型^[7]、渗滤效应理论^[8]及数值模拟技术^[9],逐步揭示了复杂介质中浆液扩散的时空演化规律;在加固性能优化方面,结合机器学习算法^[9]与多尺度表征手段^[10],实现了注浆体强度预测与环境适应性的精准调控。尽管如此,当前研究仍存在三方面局限:①微观尺度上,材料性能提升的机理(如纳米颗粒-水泥基体界面效应、固废活化机制)尚未完全阐明;②宏观尺度上,极端环境(如高应力、强化学侵蚀)下注浆材料的长期耐久性研究不足;③技术范式上,依赖经验试错的传统研发模式难以满足智能化、低碳化工程需求。

《公路水泥混凝土路面养护技术规范》提出注浆封堵技术是处置板下脱空仅有的方式,并对注浆材料、注浆布孔方法和注浆工艺作了详细规定。此后,经过不断的实践探索,人们发现水泥浆液存在流动

性差、成本较高等问题。近年来学者们进一步深化研究以改进水泥浆液，提出了在水泥浆液中加入矿物掺合料、超细水泥等，旨在进一步扩大其在工程中的应用。

研究^[11-14]利用粉煤灰替代水泥制备了低成本、环保、耐用的水泥-粉煤灰注浆材料。粉煤灰加入可使注浆材料的流动性提升、稳定性增强；随着粉煤灰掺量的增大，水化热降低幅度逐渐增大，凝结时间延长，而抗压强度逐渐减小。

掺加超细钙矾石与超细生石灰对水泥注浆材料性能和强度形成速度均产生一定影响^[15-16]。含超细钙矾石的试样凝结时间更短，后期强度显著提高；添加超细生石灰后，双组分浆体的凝结时间变短，强度发展迅速，其工作时间变短。

与普通的注浆材料相比，纤维-聚合物增强注浆材料具有优良的渗透性，后期力学性能显著提高，用于水泥混凝路面板底脱空修补^[17]。超细水泥注浆材料的早强性能适中，后期强度较高，但其固化时间较长且颗粒的超细化在带来一定的能耗的同时也增大了成本^[18-19]。在微细硅酸盐水泥中添加微细粉煤灰、微细高炉矿渣及微细钢渣等制备了一种新型微细水泥基注浆材料，其耐久性良好，可满足地下工程在腐蚀环境下的高耐久性要求^[20]。

水泥基注浆材料的脆性高，导致抗弯强度低，且其后期收缩加大，导致硬化浆体与注浆基体之间的黏结强度降低，同时部分水泥基注浆材料还存在早期强度低、凝固时间难以控制等问题^[21-22]。

（2）聚合物类注浆材料研究现状

针对聚合物类注浆材料研究,研究人员先后研发了甲基丙烯酸甲酯、环氧树脂、聚氨酯和酸性水玻璃等聚合物化学类注浆材料,并在实际工程中开展推广和应用。

王复明院士^[23]采用注浆技术,成功地将高聚物材料注入到水泥混凝土基层中,双组份在注浆压力和材料自身膨胀力的共同作用下,这种混合体能够有效地渗透到周围土体的孔隙中,并压实土体,从而实现对裂缝的高效修补。但发泡类聚氨酯遇水后发泡的粘结性和强度稳定性,以及它在车辆反复荷载下的变形特性和与沥青面层的变形并不完全协调,导致二次破坏发生。

聚氨酯发泡材料具有良好的膨胀性和早期强度,可有效治理局部的板底脱空和错台,但当错台较严重时治理效果不佳^[24]。Meng 等人^[25]将环氧树脂与异氰酸酯反应并加入水玻璃以制备改性聚氨酯,研究了环氧树脂和水玻璃对聚氨酯注浆材料的影响。发现改性聚氨酯的最高反应温度降低至 89°C,抗压强度和膨胀率分别提高至 0.27MPa 和 57%。研究发现,新型聚氨酯弹性体注浆材料的极限应变优于水泥基注浆材料,在压缩、拉伸测试中表现出较高的强度^[26]。低密度的聚氨酯注浆材料在达到峰值强度后表现出弹塑性,高密度的聚氨酯注浆材料表现出脆性破坏行为,当该材料的密度高于 0.4g/cm³ 时该注浆材料的抗压强度受温度影响较大^[27]。

丙烯酸树脂注浆材料可以形成凝结时间可控的柔性凝胶,且该凝胶具有水溶胀特性,可用于治理结构缝隙^[28]。王正胜^[29]等人研究了适用于微裂缝的丙烯酸盐注浆材料,其凝胶时间为 3~15min,固砂体单

轴抗压强度小于 1MPa。

Wang^[30]等制备了一种低黏度的环氧注浆材料，并探究了不同稀释剂种类和用量对环氧注浆材料黏度、操作时间和力学性能的影响。结果表明，该材料具有优异的注浆能力和力学性能，适用于微裂缝的修复。

(3) 复合类注浆材料研究现状

复合材料的开发旨在结合水泥基注浆材料与化学注浆材料的优点。早在 20 世纪 60 年代，我国就开始利用环氧树脂与水泥复合浆体修复大量石窟的裂缝。此后，聚氨酯-水泥、水玻璃-水泥等复合注浆材料相继被研发并应用。

Wang^[31]等人设计了一种环氧树脂改性水泥基注浆材料，并对其流变性能与力学性能进行了研究。发现，环氧树脂-水泥复合注浆材料的流动性随环氧树脂的掺入先增大后降低。可使浆体在一定时间内保持注浆流动性，环氧树脂改性提高了注浆材料的单轴抗压强度和劈裂抗拉强度。对聚氨酯-水泥复合注浆材料的力学性能进行了研究^[32-33]：随着聚氨酯的掺入材料的抗拉强度与黏结性提高，有效抑制了水的侵蚀作用，聚氨酯在一定掺量下可以改善复合材料的早期强度。

赵光明等^[34]在水玻璃注浆材料应用方面做出总结，发现水玻璃能够与氢氧化钙反应生成水化硅酸钙凝胶，从而减小水泥浆液的凝结时间；赵宏昊等^[35]研究了不同水玻璃模数对地聚合物注浆材料的影响，试验表明随水玻璃模数增大可使浆液的流动时间先减小后增大，凝结时间逐渐增大；曾志鹏等^[36]利用催化剂制备聚氨酯/水玻璃复合注浆

材料,经研究发现此类注浆材料具有良好的早期抗压强度;周梅等^[37]在水泥浆液中加入不同模数和掺量的水玻璃溶液,研究表明水玻璃模数和水玻璃掺量两者对浆液的流动度和抗压强度有显著影响;WANG等^[38]研究水玻璃和磷酸复合注浆材料对砂层性能的影响,结果表明水玻璃波美度越大,浆液凝结时间越短,注浆砂体的抗压强度越大;辛亚军等^[39]在普通硅酸盐水泥中掺入不同梯度 UEA 膨胀剂,表明 UEA 膨胀剂对浆液结石率和结石体抗压强度有促进作用,但 UEA 膨胀剂掺量梯度与结石体抗压强度无明显线性关系;张进鹏等^[40]在超细硅酸盐水泥中添加不同掺量 U 型膨胀剂测试其纵向自由膨胀率,结果表明一定掺量 U 型膨胀剂能够促进浆液结石体体积膨胀,掺量过大或过小会减缓其膨胀作用;梁紫栋等^[41]在制备新型薄喷材料中加入了粉煤灰和其他外加剂,在研究过程中发现粉煤灰能够进入水泥颗粒孔隙之间,提高材料的密实度和力学性能;ZHANG 等^[42]利用不同掺量粉煤灰代替水泥作为注浆材料,经研究发现粉煤灰掺量增加会导致浆液凝结时间增长,结石体抗压强度下降;何骞^[43]对掺入粉煤灰的水泥浆液的微观结构进行了分析,发现反应生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和钙矾石(Aft)可促进结石体密实程度,进一步提高结石体抗压强度;孙双月^[44]利用正交试验法研究矿渣、粉煤灰和水玻璃等材料对胶凝材料的影响,结果发现材料早期抗压强度的提高是由于矿渣活性较高,生成更多有利的 C-S-H 凝胶,而水灰比则对后期抗压强度影响较大。

利用水玻璃、水泥与矿物掺合料制备复合注浆材料^[45],不仅能满足注浆的需求且提高了固废利用率,其中粉煤灰可以增强新拌浆体的

流动性，膨润土可以增强复合注浆材料稳定性。水泥-水玻璃复合注浆材料中水泥颗粒较大，会影响了注浆效果，且其耐水腐蚀性和耐久性较差，会严重影响地下工程的整体质量和长期性能^[46]。

（4）现有研究存在问题

1）目前主流注浆材料存在显著性能短板。水泥基材料脆性大、易收缩，可注性差；而聚合物类材料虽渗透性好，但其模量与半刚性基层差异巨大，导致修补界面应力集中，引发二次破坏。二者均未能解决与原有路面的力学相容性核心问题。

2）现有研究对注浆修补系统的关注点多集中于材料自身的工作性、力学强度及耐久性，却普遍忽视了其与原路面结构相互作用下的力学相容性规律。需要系统研究注浆材料与沥青路面结构在动荷载下响应规律的研究。

3）复合注浆材料的微观结构形成机理与宏观性能之间的关联尚不明确，对复合注浆材料强度形成机制并不清晰，使得复合注浆材料组成设计与性能评估缺乏深入的理论指导。

4）现有研究未将复合注浆材料与传统水泥基、高聚物注浆材料开展系统的量化性能对比，材料优势缺乏直观的数据支撑，不利于工程推广应用。

2. 项目前期科研及现有工作条件

（1）项目前期科研

为确保本项目的顺利实施，项目组已开展了扎实的前期准备工作。主要研究人员由长期从事公路工程研究、材料科学与工程质量管理

理的多层次人才构成，具备深厚的理论功底与丰富的工程实践经验。

在科研准备方面，项目组已对国内外关于注浆材料，特别是聚合物改性水泥基复合材料、乳化沥青应用技术的研究资料进行了系统性的收集与整理，明确了当前技术存在的瓶颈与本项目的创新方向。同时，项目组已对陕西省内不同种类半刚性基层材料的终期强度与模量范围进行了初步调研，为后续确定注浆材料的目标模量范围奠定了数据基础。此外，室内试验与现场测试所需的仪器方案均已落实，并对依托工程交通状况、现有道路病害状况及所在地的气候、水文及地质条件掌握了较为完备的资料，为研究成果的工程适配性提供了保障。

（2）支撑条件

1) 技术支撑条件

①已开展了国内外注浆材料，特别是聚合物改性水泥基复合材料、乳化沥青应用技术的研究资料进行了系统性的收集与整理，落实了室内试验和现场试验段测试所需的一系列相关仪器，并对依托工程交通状况、现有道路病害状况及所在地的气候、水文及地质条件掌握了较为完备的资料。

②对项目研究工作进行了协作分工，确定了项目研究人员。

③依托工程项目管理单位拥有经验丰富的高级工程技术人员和道路检测设备，为试验路段注浆修补示范、注浆后性能检测、实施反馈和动态调整做了大量的准备工作。

④项目研究单位拥有一系列先进的试验仪器与检测设备，如混凝土搅拌机、万能试验机、快速冻融机、混凝土收缩仪、混凝土抗渗

机、动三轴剪力仪、粘韧性试验机，且具备本项目开展基于所需的分析试验设备，如 SEM 电镜扫描仪、红外光谱分析仪、热分析仪、X 射线衍射仪、低场核磁共振仪等，为顺利开展材料的组成成分、结构分析以及性能试验提供了良好的试验工作条件。

⑤项目承担单位具有较强的学术影响和科研实力，拥有资深的现场检测、结构与材料等理论和实践的分析人才，并具备有利的室内试验条件，确保现场检测、理论分析和室内分析顺利进行。

2) 项目组织及依托工程支撑条件

①严格按本项目计划目标组织实施，项目由承担单位和第一负责人全面负责管理，联合体各方的具体内容将以分合同形式进一步明确。

②定期召开项目进展工作会议，检查前阶段的工作进度，讨论解决研究过程中各项技术问题，布置下一阶段的工作重点和具体要求。

③对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促，以确保项目总体研究目标的实现。

④在工程应用层面，项目已获得可靠的依托工程保障。研究将紧密结合 2026 年安康市公路局负责的国省干线大中修工程(如 G210、G316、G346 等路段)开展实施。安康市公路局不仅拥有经验丰富的高级工程技术人员和道路检测设备，为试验段的标准化铺筑、快速检测与动态调整做好了充分准备，更具备组织实施养护工程的丰富经验与资金保障，确保本项目成果能及时得到实体工程的验证、总结与推

广。

(3) 技术装备条件

本课题组在前期资料调查已做了大量工作，具备课题分析理论基础和试验设备，完全可满足项目开展过程中的室内试验、分析和现场应用研究工作的需要。

本项目承担单位为西安科技大学，其在公路维护与运营管理等方面积累了丰富的经验与数据，并且拥有大量工程实体作为项目的支撑。同时，拥有一批在领域内具有较强影响力的教授与专家学者和具有丰富工程实践经验、工作勤恳踏实的工程技术人员。参加本项目研究的是道路工程中心人员具有完备且合理的学术梯队，研究人员具有较强的科研能力和较高的科研水平。

本项目组在前期资料调查以做了大量工作，具备课题分析理论基础和试验设备，完全可满足项目开展过程中的室内试验、分析和现场应用研究工作的需要。

(4) 研究人员情况及协作条件

项目组由安康市公路局与西安科技大学的专家、技术人员联合构成，人员结构合理，专业特长互补。团队核心成员包括正高级、副高级及中级研究人员，并吸纳了外聘教授与研究生，形成了良好的学术梯队。

项目组学术氛围浓厚，工作扎实，人员搭配结构合理，团结协作精神强。项目负责人长期从事沥青路面养护及路面安全运营的相关工作，积累了丰富的经验。项目负责人及主要成员长期深耕于道路工程

领域,主持或参与过多项国家级、省部级科研项目,在道路结构分析、材料研发与工程质量管理方面积累了丰富的经验。团队学术氛围浓厚,协作精神强,确保了项目从理论研究、试验开发到工程应用各环节的紧密衔接与高效推进。

综上所述,项目组在理论基础、技术路线、科研装备、人员配置及工程依托等方面均已具备完成本项目所需的各项条件,能够确保研究计划如期推进,并取得预期的研究成果。

3. 参考文献

- [1] DARG, FSL, SÁNCHEZ L, et al. A comprehensive review of cementitious grouts: Composition, properties, requirements and advanced performance [J]. Construction and Building Materials, 2023 (375): 1-16.
- [2] 杜明瑞. 碳纳米管增强水泥基注浆材料力学特性及其微观作用机理 [D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2018.
- [3] 付宏渊, 付思妮, 邱祥, 等. 纳米 Al_2O_3 协同水性环氧树脂对水泥基锚固注浆材料改性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (9): 3016-3027.
- [4] 宋国壮, 王连俊, 张艳荣, 等. 聚合物-水泥基注浆材料早期流变及水化特性 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50 (9): 31-35.
- [5] 李鑫磊, 韩晓龙, 李永利, 等. VAE 改性水泥基注浆材料性能研究 [J]. 矿业研究与开发, 2021, 41 (9): 108-112.
- [6] 张健. 赤泥协同多源固废制备注浆材料组成设计、水化机理与性能调控 [D]. 山东济南: 山东大学, 2021.
- [7] 李召峰, 高益凡, 张健, 等. 水溶性植物胶改性水泥-水玻璃封堵材料试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (7): 1312-1321.
- [8] 冯啸, 刘人太, 李术才, 等. 考虑深层渗滤效应的水泥浆动界面特征研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35 (5): 1000-1008.
- [9] 刘健, 刘人太, 张霄, 等. 水泥浆液裂隙注浆扩散规律模型试验与数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (12): 2445-2452.
- [10] 徐潇航, 胡张莉, 刘加平, 等. 基于机器学习回归模型的三峡大坝混凝土强度预测 [J]. 材料导报, 2023, 37 (2): 45-53.
- [11] 张玉. 水泥基注浆材料浆液扩散规律和预测控制试验研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- [12] Mirza J., Mirza M. S., Roy V., et al. Basic Rheological and Mechanical Properties of High-volume Fly Ash Grouts [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(6): 353-363.
- [13] 李燕清, 向阳开, 熊潮波. 水泥混凝土路面板底脱空灌浆材料研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2012, 31(5): 957-961.

- [13] 童立元,潘石,邱钰,等.大掺量粉煤灰注浆充填材料试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2002,32(4):643-647
- [14] Moghaddam F., Sirivivatnanon V., Vessalas K. The Effect of Fly Ash Fineness on Heat of Hydration, Microstructure, Flow and Compressive Strength of Blended Cement Pastes[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 10: e00218.
- [15] Zhang J., Guan X., Li H., et al. Performance and Hydration Study of Ultra-fine Sulfoaluminate Cement-Based Double Liquid Grouting Material[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 132: 262-270.
- [16] Li H., Guan X., Zhang X., et al. Influence of Superfine Ettringite on the Properties of Sulphoaluminate Cement-Based Grouting Materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 166: 723-731.
- [17] Shu X., Zhao Y., Liu Z., et al. A study on the Mix Proportion of Fiber-Polymer Composite Reinforced Cement-Based Grouting Material[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 328: 127025.
- [18] Markou I. N., Droudakis A. I. Factors Affecting Engineering Properties of Microfine Cement Grouted Sands[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2013, 31(4): 1041-1058.
- [19] Tian M., Han L., Meng Q. Experimental Study on the Mechanical Performance of Grouted Specimen with Composite Ultrafine Cement Grouts[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2020, 24(2): 1226-7988.
- [20] Sha F., Fan G. Durability of a Novel Effective Microfine Cementitious Grouting Material in Corrosion Environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 306: 124842.
- [21] Zhang C., Yang J., Ou X., et al. Clay Dosage and Water/Cement Ratio of Clay-Cement Grout for Optimal Engineering Performance[J]. *Applied Clay Science*, 2018, 163: 312-318.
- [22] Jafarpour P., Moayed R. Z., Kordnaeij A. Behavior of Zeolite-Cement Grouted Sand under Triaxial Compression Test[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(1): 149-159
- [23] 石明生,马小跃,王复明,等.高聚物注浆技术在水泥混凝土道路维修中的应用[J].河南科学,2010,28(01):74-77.
- [24] 王革.聚氨酯发泡材料处治水泥混凝土路面板底脱空的应用研究[D].南京:东南大学,2015.
- [25] Meng F., Wang S., Dong X., et al. Preparation and Performance Enhancements of Low Heat-Releasing Polyurethane Grouting Materials with Epoxy Resin and Water Glass[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6397
- [26] Fang H., Zhao P., Zhang C., et al. A Cleaner Polyurethane Elastomer Grouting Material with High Hardening Strain for the Fundamental Rehabilitation: The Comprehensive Mechanical Properties Study[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 318: 125951.
- [27] Liu K., Liang W., Ren F., et al. The Study on Compressive Mechanical Properties of Rigid Polyurethane Grout Materials with Different Densities[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 270-278.
- [28] Cui Y., Tan Z., An C. Research and Application of Multi-Functional Acrylic Resin

- in Grouting Material[J]. Construction and Building Materials, 2022, 359: 129381.
- [29] 王正胜,宋雪飞,吕华文.丙烯酸盐注浆材料实验研究及其应用[J].煤炭工程,2013, 45: 140-142.
- [30] Wang C., Niu L., Zhang X., et al. Working Performance and Composition Optimization of Low-Viscosity Epoxy Grouting Material for Cast-in-Place Cement Concrete [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(9): 34.
- [31] Wang Y., Liu Q. Investigation on Fundamental Properties and Chemical Characterization of Water-Soluble Epoxy Resin Modified Cement Grout[J]. Construction and Building Materials, 2021, 299: 123877.
- [32] 严国超,白龙剑,张志强,等.PU 改性硫铝酸盐水泥注浆材料试验与应用[J].煤炭学报, 2020, 45(S2):747-754.
- [33] Tang J., Liu J., Yu C., et al. Influence of Cationic Polyurethane on Mechanical Properties of Cement Based Materials and its Hydration Mechanism[J]. Construction and Building Materials, 2017, 137: 494-504.
- [34] 赵光明, 王艳芬, 艾洁, 等. 矿用水泥基注浆材料的发展及展望[J]. 中国矿业大学学报, 2024, 53 (1) : 1-22.
- [35] 赵宏昊, 刘宪明, 李鹏, 等. 考虑道路层间脱空病害的地聚合物注浆材料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (12) : 4559-4571.
- [36] 曾志鹏,宋小艳,孙勇,等.聚氨酯/水玻璃注浆材料固化过程中的微观结构和力学性能[J].材料研究学报, 2022, 36 (11) : 855-861.
- [37] 周梅, 白金婷, 郭凌志, 等. 基于响应曲面法的煤矸石地聚物注浆材料配比优化[J]. 材料导报, 2023, 37 (20) : 123-131.
- [38] WANG X Y, WANG C, LI P F, et al. Experimental study on new grouting material of acidic sodium silicate and its properties of grouted-sand[J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 1-16.
- [39] 辛亚军, 王宇, 吴春浩, 等. 粉煤灰基 UEA 改性注浆材料力学特性与失稳模式[J]. 煤炭工程, 2023, 55 (2) : 123-127.
- [40] 张进鹏, 刘立民, 刘传孝, 等. 深部裂隙岩体硅质自应力注浆加固机制与试验[J]. 煤炭学报, 2020, 45 (S2) : 755-765.
- [41] 梁紫栋, 严国超, 白旭阳, 等. 普通硅酸盐-硫铝酸盐水泥复合薄喷材料的研发与应用[J]. 中国矿业, 2023, 32 (7) : 158-164.
- [42] ZHANG C, FU J X, SONG W D. Mechanical model and strength development evolution of high content fly ash-cement grouting material[J]. Construction and Building Materials, 2023, 398: 132492.
- [43] 何骞.采煤沉陷区充填治理粉煤灰-建筑骨料浆液性能研究[J].煤矿安全, 2023, 54 (7) : 178-187.
- [44] 孙双月.利用矿渣和粉煤灰制备地聚物胶凝材料的正交试验研究[J].中国矿业, 2019, 28 (11) : 118-122,127.
- [45] 夏冲,李传贵,冯啸,等.水泥粉煤灰-改性水玻璃注浆材料试验研究与应用[J].山东大学学报(工学版),2022,52(1):66-73.
- [46] Cui Y., Tan Z., Han D., et al. Investigation and Application of a High Performance Grouting Material in Water-Rich Silty Fine Sand Stratum[J]. Construction and Building Materials, 2022, 329: 127100.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

(1) 复合注浆材料研发与性能验证。结合正交试验与模糊优选理论，在可接受内调控注浆材料的最终模量，使其与半刚性基层模量相匹配，实现“模量平衡”。

(2) 复合注浆材料组分交织及界面强度形成机制。通过微观测试，揭示组分相互交织作用机理、颗粒包裹状态与分布、材料水化进程和强度形成机理，为工艺参数设定提供理论依据。

2. 主要研究内容及实施方案

研究内容 1：（1）基于模量匹配的沥青路面注浆修补结构动力响应有限元分析

通过有限元方法，建立注浆修补沥青路面结构数值模型，分析注浆材料与半刚性基础材料不同模量比条件下，路面结构在荷载作用下的动态响应规律，探讨模量差异对结构受力状态的影响机制。结合不同路段半刚性基层中长期抗压强度与回弹模量的调研，综合确定适用于半刚性基层注浆修补的复合注浆材料刚度参数范围，为后续材料组成设计提供理论约束。

实施方案： 1) 调研各类无机结合料稳定基层的中长期抗压强度和回弹模量范围，结合前期研究成果，构建注浆修补路面结构数值模型；

2) 通过有限元计算，获取不同模量比条件下注浆修补路面的动态响应指标变化规律，分析模量差异对结构受力状况的影响；

3) 综合有限元分析与调研数据, 提出复合注浆材料刚度参数的合理取值范围。

研究内容 2: (2) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与性能验证

以高流动性、高粘结性和半刚性基层模量平衡为研发目标, 采用无机/有机复配思路, 通过掺加柔性胶粉等手段调节材料模量、提升韧性和粘结强度。通过正交试验与模糊优选理论, 综合考虑流动性、粘结性、模量等关键指标, 确定各组分最佳掺配比例, 制备新型复合注浆材料, 并对其力学性能、粘结性能、相容性及稳定性进行系统验证。

实施方案: 1) 采用正交试验设计, 结合模糊优选理论, 以流动性、粘结性、模量等为优化目标, 确定复合注浆材料各组分最佳掺配比例;

2) 按优化配比制备复合注浆材料, 通过室内试验系统验证其力学性能、粘结性能、相容性及稳定性;

3) 开展不同配方及注浆材料类型(传统水泥注浆、高聚物注浆、地聚物注浆材料)对水泥稳定试件修复分析, 以水泥稳定碎石试件的力学性能指标, 验证模量差异及注浆材料对水泥稳定基层的修复效果。

研究内容 3: (3) 聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料多尺度交织作用机理研究

采用微观测试手段分析其水化进程、微观结构与组分交互作用,

探究聚合物、水泥、乳化沥青等多相材料之间的交织机理、颗粒包裹状态及分布规律。结合宏观力学性能，开展宏微观多尺度对比分析，揭示复合注浆材料强度形成与性能演化的内在机制，为材料组成优化与性能调控提供理论支撑。

实施方案：1) 利用 XRD、FTIR、SEM、AFM 等微观测试技术，分析复合注浆材料的微观特性及不同龄期的水化进程；

2) 基于微观测试数据，分析各组分之间的相互交织作用机理、颗粒包裹状态及空间分布规律；

3) 开展宏微观性能多尺度对比，建立微观结构与宏观性能之间的关联，揭示复合注浆材料强度形成机理。

研究内容 4：（4）聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料评价方法及施工工艺研究

基于不同材料组成掺配比例对注浆材料力学性能与模量性能的影响规律，分析其强度、刚度及模量特征的变化趋势，探究复合注浆材料“脆性-韧性”转变机制。提出以模量平衡为核心的复合注浆材料合理的评价方法。针对沥青路面半刚性基层裂缝、脱空、松散等典型病害场景，通过现场试验与工程验证，系统总结注浆材料施工工艺及设备要求，明确注浆压力、布孔方式、孔距等关键控制参数，形成复合注浆工艺。

实施方案：1) 系统研究不同材料组成掺配比例对注浆材料力学性能、模量性能的影响，分析强度、刚度及模量特征的变化规律，探究“脆性-韧性”转变机制；

2) 基于材料性能对比与分析, 提出实现模量平衡的复合注浆材料合理评价方法与关键指标;

3) 选择不同类型病害工况, 通过现场试验与工程验证, 总结注浆材料施工工艺及配套设备, 明确注浆压力、布孔方式、孔距等关键控制参数, 形成差异化注浆工艺, 并对其开展性能观测, 对比分析不同注浆材料的综合效益。

3. 技术路线

(1) 研究技术方案

为了实现课题目标, 收集整理国内外相关研究资料, 并对安康市不同国省干线半刚性基层材料终期强度、模量展开了初步调研, 为本项目实施方案的制定、研究工作的开展奠定了前期基础。本项目将采用理论分析、数值模拟、室内缩尺模型试验、室内外试验与微观机理研究相结合的技术路线, 系统开展研究工作。具体技术路线如下:

1) 模量匹配与结构响应

调研水泥稳定基层中长期抗压强度与回弹模量范围, 基于前期研究成果, 构建注浆修补沥青路面结构有限元模型, 设置不同的注浆材料-基层模量比工况, 分析路面结构在车辆荷载作用下的动态响应。

综合分析模量差异对结构受力状态的影响规律, 结合基层性能调研数据, 提出复合注浆材料刚度参数的合理目标范围。。

2) 复合注浆材料研发与性能验证

选取水泥、乳化沥青、聚合物等作为基础组分; 以高流动性、高粘结性、模量平衡为优化目标, 采用正交试验设计安排不同组分掺量

组合；结合模糊优选理论，综合考虑流动性、粘结强度、模量、凝结时间等多指标，确定各组分的最佳掺配比例。验证力学性能（抗压强度、抗折强度、弹性模量、粘结强度）、工作性能（流动度、可注性）、耐久性能（抗水损害能力、相容性等）。

3) 多尺度交织作用与强度形成机理

基于 XRD、FTIR、SEM 及 AFM 分析不同龄期下水泥水化、聚合物成膜、沥青分散的协同过程，揭示多相材料之间的交织作用机理与空间分布规律。将微观结构参数（如水化产物形态、界面结合状态）与宏观性能（强度、模量、韧性）进行关联分析，建立“微观结构 → 宏观性能”的映射关系，揭示复合注浆材料强度形成与性能演化机理。

4) 评价方法与施工工艺

基于不同配比材料的力学性能与模量特征数据，分析强度、刚度及模量的变化规律；探究复合注浆材料的“脆性-韧性”转变机制，提出以模量平衡为核心的合理评价方法及关键指标。

针对半刚性基层沥青路面的典型病害场景（结构裂缝、基层脱空、松散等），开展现场注浆试验；系统总结注浆材料施工工艺及配套设备要求，明确关键控制参数：注浆压力、布孔方式、孔距、注浆量、稳压时间等；形成注浆工艺体系。

(2) 研究工作流程

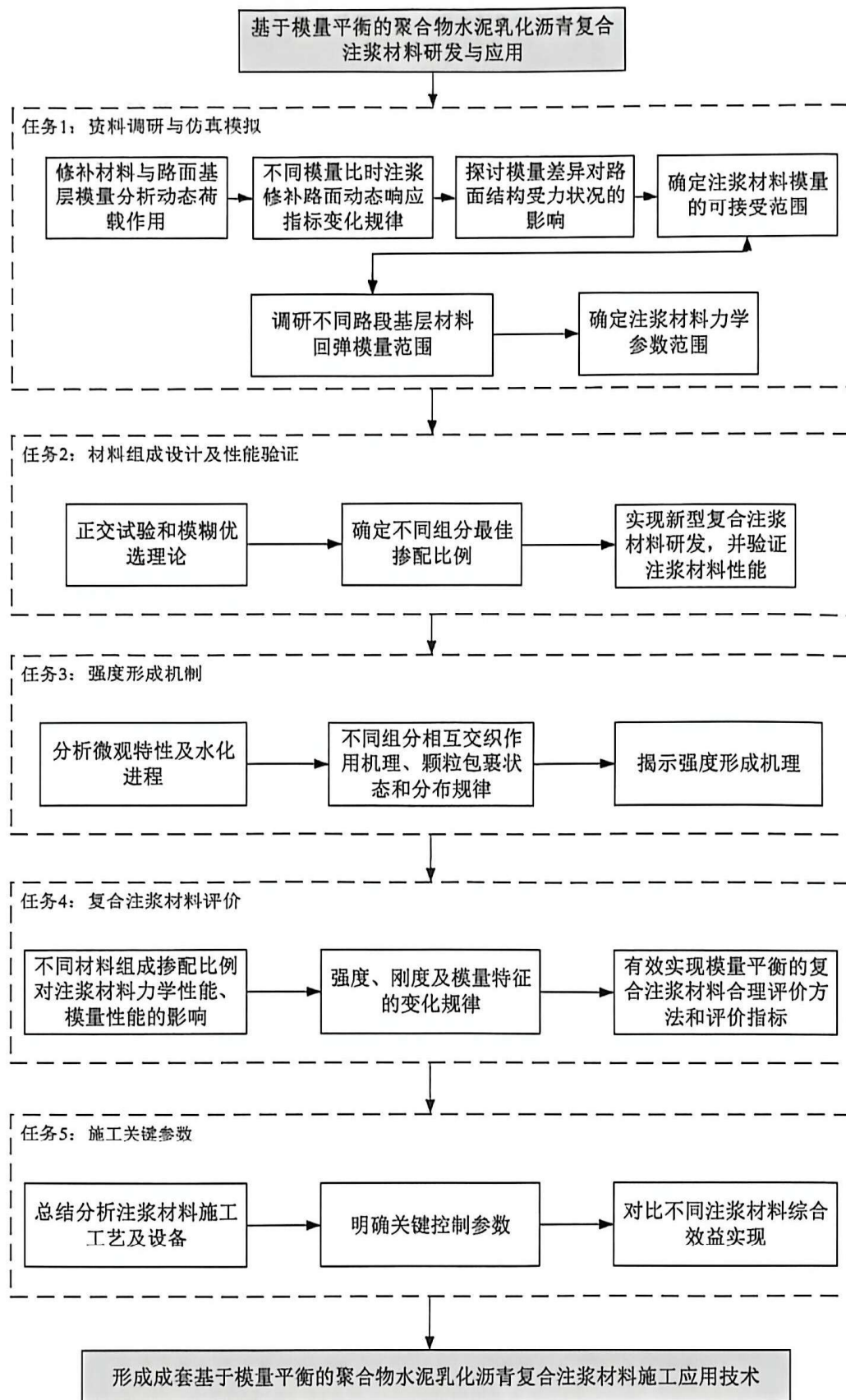


图 1 技术路线图

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目拟形成一套成熟可靠的“模量平衡”注浆修复技术体系。研究成果能够快速转化为解决道路养护实际问题的生产力，项目研究得到注浆材料及其评价指标和关键的施工工艺参数，可直接用于指导安康市乃至陕西省年度公路养护工程，提升养护质量与效率。通过建立示范工程和推广应用，纳入绿色交通养护技术体系，为健全绿色交通养护技术体系、推动养护行业向资源节约与环境友好方向发展提供关键技术支撑，形成科研引领、产业协同、工程应用的良性循环。

通过以下路径实现与后续工程实践和技术升级的紧密衔接，推动产品及技术的标准化。项目结题后，基于研究成果编制《聚合物水泥乳化沥青复合注浆技术施工指南》。同时，针对沥青路面半刚性基层脱空、松散等病害处治，以及水泥混凝土路面板底脱空注浆填充两类典型应用场景，进一步明确不同场景下的材料选型、注浆工艺及质量控制要求，对注浆材料进行进一步升级，以满足多样化工程需求。

5. 有关技术经济指标

- (1) 研发得到基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆；
- (2) 提出有效实现模量平衡的复合注浆材料合理评价方法；
- (3) 实现 2h 开放交通。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

本项目由西安科技大学和安康市公路局共同承担，前者为科研单位，负责研究大纲制定、试验及测试分析研究、报告编写等工作；后

者为实体工程建设的组织单位，负责项目研究的各项组织实施工作。

（1）西安科技大学

西安科技大学作为本项目的承担单位，完全有能力承担本项目的研发工作。西安科技大学建工学院的土木工程专业为国家级特色专业建设点，具有土木工程专业一级学科博士学位和硕士学位授予权，其中岩土工程学科为陕西省重点学科，设有土木工程博士后科研流动站；学院有教职工 169 多人，其中教授 21 人，博导 14 人，副教授或相当专业技术职务 58 人，获政府特殊津贴的 2 人，入选省部级跨世纪拔尖人才的 4 人；科研基地涵盖陕西省高速公路建设集团公司、陕西建工集团、西安地铁建设公司等 11 家单位，学院拥有实验仪器设备 2000 余台（套），价值 4000 余万元，面积 8000 余平方米。道路工程研究中心拥有对混凝土性能测试的整套试验测试设备，并具有很强的设备开发能力；混凝土材料微细观分析及力学性能试验系统，其中 SEM 电镜扫描仪、差热分析仪、热重分析仪、X-衍射仪、红外光谱分析仪、电子探针、扫描电镜、快速冻融机等设备在国内相同学科处于先进水平。

学院近五年来共承担科研项目 120 项，累计到款 8000 余万，其中承担国家攻关项目 2 项，部委联合攻关项目 14 项，陕西科技项目 12 项，交通厅项目 12 项。获得国家科技进步二等奖 1 项，部级二等奖 16 项，三等奖 12 项，获陕西省科技进步一等奖 2 项，二等奖 5 项。

（2）安康市公路局

安康市公路局现有人员 1098 人，其中：管理类 157 人,管理八级

以上 73 人；专业技术 291 人，包含工程类 209 人，占比达 71%，专业技术人员当中：高级职称 3 人，副高级职称 36 人，中级职称 99 人；工勤人员 641 人，其中技师 55 人，高级工 243 人。科研项目《秦巴山区区域桥梁预防性养护关键技术与工程示范》获得陕西省科技进步奖三等奖，近年来取得实用新型专利授权二十余项、计算机软件著作权 1 项，参与编写地方标准 3 部，1 个科研课题获陕西省企业“三新三小”创新竞赛二等奖。

2. 技术力量及人员构成

道路工程研究中心拥有对混凝土材料微细观分析及力学性能试验系统，其中 SEM 电镜扫描仪、差热分析仪、热重分析仪、X-衍射仪红外光谱分析仪、电子探针、扫描电镜等设备在国内相同学科处于先进水平。实力雄厚的研究队伍和先进完善的试验设备，为该项目的顺利实施提供了强有力的保障。项目具体人员见表 1。

表 1 项目研究主要成员情况

姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
李志刚	西安科技大学	男	1988-04	副高级	道路工程（路面）	项目负责人
李寒松	安康市公路局	男	1974-07	副高级	道路工程（路面）	项目总协调
邓波	安康市公路局	男	1985-06	中级	道路工程（路面）	理论推导
景宏君	西安科技大学	男	1974-08	正高级	道路工程（路面）	技术研发

宋宁	安康市公路局	男	1970-05	副高级	道路工程（路基）	方案实施
王洪专	安康市公路局	男	1978-06	中级	道路工程（路面）	方案实施
邹晓龙	西安科技大学	男	1988-04	副高级	道路工程（路面）	模拟与计算
赵桂娟	西安科技大学	男	1980-07	中级	道路工程（路基）	性能评价
李建阁	西安科技大学	男	1991-10	中级	道路工程（路基）	数据调研
刘马磊	西安科技大学	男	2003-10	技术员级	道路工程（路基）	试验分析

3. 各自承担的主要工作

（1）西安科技大学

- 1) 负责制定室内试验研究大纲和具体实施方案；
- 2) 负责室内外试验方案的制定与实施；
- 3) 参与注浆试验段的实施；
- 4) 负责项目研究报告的撰写；
- 5) 负责项目的验收。

（2）安康市公路局

- 1) 负责制定项目总体研究大纲和总体方案；
- 2) 负责注浆试验段的实施；
- 3) 参与项目的验收。

4. 项目主要负责人情况

李志刚，副教授，工学博士，硕士研究导师。近五年主持国家级、省部级项目 10 余项，包括国家自然科学基金项目 1 项、山东省重点研发

项目 1 项、省自然科学基金 2 项。在国内外重要期刊上公开发表学术论文 40 篇，其中 SCI/EI 论文 20 篇；授权/申请专利 24 项，其中发明专利 10 项；参编地方标准 3 部；获 2020 年陕西省优秀博士论文，2024 年陕西省公路学会青年科技奖，2024 年山东土木建筑学会科技进步二等奖，2024 年陕西省交通运输科技进步二等奖，山东省高校青年创新团队核心成员；兼任陕西省公路学会第七届青年委员会委员，《长安大学学报（自然科学版）》、《市政技术》、《交通科学与技术》等期刊青年编委。主要从事沥青及沥青混合料改性技术，沥青路面再生等环保型道路铺筑技术，高性能路面材料研发与性能评价，固废材料在道路工程中再利用等相关技术研究。

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

本研究拟依托安康市公路局所管辖安康市养护工程项目开展实施，拟计划在 G210、G316 等线路典路段完成试验路段注浆，完全能够保证科研的顺利实施。

2. 投资来源

经详细调研与审慎测算，本着成本节约、经济适用的原则，本课题研发总投入为 44.97 万元。其中，陕西省交通运输厅补助 19.97 万元，工程配套 25 万元，以保障项目各项工作的顺利实施。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目研究起止日期为 2026 年 4 月至 2028 年 3 月。课题具体计划进度安排如下：

(1) 2026 年 4 月至 2026 年 6 月

整理相关研究现状，完成项目的立项工作，准备试验所需材料和仪器，编写研究大纲和工作实施详细计划；通过调研无机结合料稳定基层、底基层的力学强度和刚度范围。

(2) 2026 年 7 月至 2026 年 9 月

利用有限元分析，开展注浆修补后路面动态响应指标变化规律及模量差异对路面结构受力状况的影响；结合有限元分析和调研数据，综合确定注浆材料模量的可接受范围。

(3) 2026 年 10 月至 2026 年 12 月

基于无机/有机复配思路，优选水泥、乳化沥青、聚合物胶粉等原材料；根据正交试验和模糊优选理论，综合优化注浆材料的材料组成，实现新型复合注浆材料研发。

(4) 2027 年 1 月至 2027 年 3 月

制备新型复合注浆材料，系统验证其力学性能、粘结性能、相容性及稳定性，并与传统水泥、高聚物注浆材料的开展性能对比试验。

(5) 2027 年 4 月至 2027 年 6 月

采用 SEM、XRD、FTIR 等微观测试手段，分析复合注浆材料水化产物、微观结构及界面过渡区特征，探究聚合物、水泥、乳化沥青三相交织机理与颗粒分布规律。

(6) 2027 年 7 月至 2027 年 9 月

开展宏微观多尺度对比分析，揭示强度形成与性能演化内在机制；探究不同材料组成注浆材料强度、刚度及模量特征的变化规律，

提出复合注浆材料合理评价方法和评价指标。

(7) 2027 年 10 月至 2027 年 12 月

通过试验路段现场总结分析注浆材料施工工艺及设备要求,明确注浆压力、布孔方式及孔距等关键控制参数。

(8) 2028 年 1 月至 2028 年 3 月

整理相关研究资料,撰写项目研究报告,项目总结验收。

4. 组织管理形式

(1) 本项目各项研究内容和计划严格按项目计划目标组织实施;

(2) 项目由负责单位和第一负责人全面负责管理,明确分工协作、经费拨付、考核目标和责任要求等具体内容;

(3) 每 3 个月定期召开项目工作会议,检查前阶段的具体工作研究进展和实施深度,讨论解决研究过程中的各项技术问题和其他事宜,布置后阶段的工作重点和具体要求。对不能按时、保质完成研究任务的人员及时予以更换;

(4) 对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促,以确保项目总体研究目标的实现。

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	19.97	合 计	44.97	19.97	
工程配套研究经费	25.0	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	36.97	19.97	
		（1）材料费	3.0	1.0	
		（2）测试化验实验加工费	22.0	13.5	
		（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	4.27	2.27	
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	5.0	2.0	
		（6）其他费用	2.7	1.2	
		3.劳务费	3.0	0.0	
		（1）专家咨询费	1.5	0.0	
		（2）聘用人员劳务费	0.0	0.0	
		（3）其他劳务费	1.5	0.0	
		（二）间接费用	5.0	0.0	
		4.管理费	2.2	0.0	
		5.绩效支出	2.8	0.0	

注：预算编制按照《陕西省人民政府办公厅关于改革完善省级财政科研经费管理的实施意见》（陕政办发[2022]3号）文件执行，详见附件《科研经费预算编制说明》。项目验收将组织财务专项验收或审计

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）	1
		（1）授权发明专利	
		（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）	1
		（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
		（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	
	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
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（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
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	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	3
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	3
		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	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

本项目围绕模量平衡的复合注浆材料研发与评价，拟实现以下预期目标：

- (1) 研发得到基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆；
- (2) 提出有效实现模量平衡的复合注浆材料合理评方法；
- (3) 实现 2h 开放交通。

2. 提交的研究成果及其形式

(1) 提交《基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用》研究报告；

(2) 提交《基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆技术施工指南》；

(3) 发表高水平论文 1 篇；

(4) 申请专利 1 项。

3. 经济、社会、环境效益分析

经济效益方面，采用非开挖注浆技术可显著缩短工期，极大减少了交通中断带来的间接经济损失。同时，模量匹配修复有效避免因二次破坏导致的反复维修，延长路面使用寿命，从而降低整个生命周期养护成本。随着该技术在陕西省乃至全国公路养护市场推广应用，其高效、病害针对性的优势将显著提升市场竞争力，并产生显著的间接经济效益。

通过使用模量平衡的注浆材料，有效消除因修补不当导致的二次

脱空与裂缝，大幅提升道路平整度与结构性安全，预计可有效降低因此类隐性病害引发的交通事故风险。推动注浆养护行业从“经验性修补”向“科学、针对性修复”升级，提升我省在该领域的技术水平与国际与竞争力。成果的推广应用将直接服务于安康市国省干线养护工程，保障人民安全便捷出行，具有广泛而积极的社会影响。

项目所开展非开挖注浆材料与技术，紧扣“资源节约”与“降污减碳”两大主题。非开挖工艺避免了传统“开膛破肚”式维修产生的大量建筑垃圾与扬尘污染，能显著减少废料产生。研发复合注浆材料因模量平衡其修补耐久性得到提升，从而实现了资源节约。全寿命周期的节能减排效果显著，相比传统开挖重铺工艺，可显著降低能源消耗与碳排放，契合国家“双碳”战略，为构建绿色低碳的交通养护体系提供了关键技术支撑。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

同意申报，依托工程及配套经费已落实



单位负责人：（签字）



2024年3月27日

**基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料
研发与应用
大纲评审意见**

2026年3月24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“基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用”（项目编号：25-85K）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、研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

二、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。

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：进一步突出研究重点，明确应用场景。

主任委员：



2026年3月24日

专家审查意见表

项目名称	基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用				
专家姓名	梁武星	职务/职称	正高	专业	公路工程
专家单位	西安公路研究院			联系电话	13609110361

评审意见

同意审查通过。

建议：

1. 明确处理对象及场景。

2. 突出研究重点，不建议

重点放在力学响应分析上。

评审专家（签字）：

梁武星

2026年3月24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	基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用				
专家姓名	路鑫	职务/职称	正高级工程师	专 业	公路工程
专家单位	陕西高速公路工程试验检测有限公司			联系电话	15091850063

评 审 意 见

项目针对当前沥青路面注浆材料模量失配、易二次破坏、耐久性差等突出问题，提出“模量平衡”设计理念，开展聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发、机理分析、工艺优化与工程应用研究，选题针对性强、技术路线清晰、具有一定的应用前景，符合我省公路养护技术升级与绿色低碳发展方向，同意立项。建议如下：

（1）研究内容第一部分采取有限元分析和调研各类无机结合料稳定基层的中长期抗压强度和回弹模量范围，综合确定复合注浆材料刚度参数范围，建议增加室内试验对理论分析进行验证；

（2）研究内容第二部分中建议补充与传统水泥注浆材料、高聚物注浆材料的性能进行对比，用数据体现复合注浆材料的优势；

（3）检查并修改大纲正文的个别错字及格式，如第 13 页“X 射线衍射仪”，第 22 页的“复合注浆材料”等。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 24 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	基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用				
专家姓名	赵海东	职务/职称	正高工	专 业	公路工程
专家单位	邯郸市交通运输局			联系电话	13701190090

评 审 意 见

以下意见仅供参考：

1. 该课题主要针对沥青路面的半刚性基层裂缝进行处置，同样适用于水泥混凝土路面基层的裂缝处理。
2. 当裂缝贯穿到底基层及以下模量发生变化时，如何注浆进一步研究。
3. 根据不同条件进行现场试验，并进行长期观测验证完善。
4. 经费估算考虑配套研究经费。

评审专家（签字）：

赵海东

2026 年 3 月 24 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	基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用				
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

非开挖注浆修补技术是指在不破坏原有路面的条件下，将注浆材料通过一定压力注入到沥青路面裂缝部位以提高其承载能力和耐久性能，起到路面结构加固补强作用。但目前关于注浆修补材料的研究主要集中在注浆材料的工作性能、力学性能和耐久性能等方面，对注浆材料与原破损路面力学性能的相容性关注不多。项目对此开展研究，具有意义。

基于沥青路面裂缝注浆材料的模量与原路面结构相容性，以无机/有机复配形式达到模量匹配目标，并提高材料粘结强度，同时研究注浆修补材料性能、材料组成、评价指标及施工工艺，为道路注浆修补材料的工程应用提供参考。为此，课题的主要研究内容包括：1）基于模量差异的沥青路面结构动力响应有限元分析；2）聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与性能验证；3）聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料组分交织作用机理；4）聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料评价方法及施工工艺研究。其中，注浆修补路面动态响应演变规律，复合注浆材料性能验证，复合注浆材料界面强度形成机制等是拟解决的关键技术问题。

项目研究内容完整，目标明确，技术路线可行；课题组具备良好研究基础和实验条件，承担单位有较强技术研发能力，人员组成合理，依托工程落实；预期研究成果覆盖意见目标，与研究内容的逻辑框架契合，拟提出的研究成果形式有技术报告、专利论文、施工指南等，同意研究大纲通过评审。

建议：研究内容宜聚焦半刚性基层的裂隙修补，明确适宜的裂缝修补类型（温度缝、收缩缝、结构缝等）。

评审专家（签字）：

2026 年 03 月 24 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

材料研究

项目名称	基于核素标记的页岩气吸附与运移机理研究				
专家姓名	王华	职务/职称	正高	专业	材料科学
专家单位	山西交通职业技术学院			联系电话	13803669957

评审意见

项目研究目标明确，思路清晰，
技术路线可行，同意立项通过评审。

建议：

1. 扩大页岩气吸附研究，可拓展至煤层气
2. 页岩气吸附机理研究应用。

评审专家（签字）：

王华

2026年3月24日

（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）

基于模量平衡的聚合物水泥乳化沥青复合注浆材料研发与应用（项目编号：25-85K）

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	梁武星	西安公路研究院	公路工程	公路工程	正高工	梁武星
2	委员	路鑫	陕西高速公路工程试验检测有限公司	公路工程	公路工程	正高工	路鑫
3	委员	赵卫东	铜川市交通运输局	公路工程	公路工程	正高工	赵卫东
4	委员	罗强	西南交通大学	道路与铁道工程	路基工程	教授	网上评审
5	委员	申俊敏	山西交通科学研究院集团	公路工程	公路工程	正高工	网上评审

专家意见处理表

项目名称：基于模量平衡的聚合物水泥乳化石灰土材料研发与应用（项目编号： 25-85K）

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	梁武星	1.明确处治对象及应用场景 2.突出研究重点，不建议重点放在力学响应分析上	1.已在大纲中明确核心处治对象为高速公路、国省干线、市政道路等工程中沥青路面出现的结构层脱空，半刚性基层裂缝、松散及强度衰减等病害；同时，产品研发完成后可扩展应用于水泥混凝土路面板底脱空注浆加固，进一步尝试处治因板底脱空病害； 2.已经将力学响应分析仅作为确定注浆材料模量范围的前置分析，精简有限元分析内容。
2	路鑫	1.第一部分内容建议增加室内试验对理论分析进行验证 2.第二部分内容建议补充与传统水泥注浆材料、高聚物注浆材料的性能进行对比，用数据体现复合注浆材料优势 3.检查并修改大纲正文的个别错字及格式	1.在第二部分研究内容增加“不同配方及注浆材料类型（传统水泥注浆、高聚物注浆、地聚物注浆材料）对水泥稳定试件修复分析，以水泥稳定碎石试件的力学性能指标，验证模量差异及注浆材料对水泥稳定基层的修复效果” 2.已对大纲全文检查核对，修正了个别错别字及格式，确保大纲文本严谨、规范、准确

3	赵卫东	1.同样适用于水泥混凝土路面基层的裂缝处理 2.当裂缝贯穿到底基层及以下模量发生变化时，如何注浆进一步研究 3.根据不同条件进行现场试验，并进行长期观察验证完善 4.经费估算未考虑配套研究经费	1.在大纲中全面拓展研究范围，将水泥混凝土路面基层纳入处治对象； 2.由于路面病害发生/层位复杂，本研究目前仅以水泥稳定基层（包括底基层）作为研究对象，研发形成模量匹配的注浆材料。针对病害进一步贯穿至底基层以下时，可参考复合注浆进行处置； 3.选取不同病害类型（浅层 / 深层 / 脱空）开展现场注浆，明确注浆工艺，并开展性能观测； 4.已补充经费估算中的自筹配套经费。
4	罗强	建议研究内容宜聚焦半刚性基层的裂隙修补，明确适宜的裂缝修补类型（温度缝、收缩缝、结构缝等）。	已在研究大纲中进一步聚焦研究范围，明确本项目半刚性基层裂缝、松散及强度衰减等病害为主要处治对象。明确所研发复合注浆材料可应用于半刚性基层各类裂缝的处置。
5	申俊敏	建议扩大应用场景研究，可拓展在水泥混凝土路面板底脱空注浆应用	已在“市场需求前景或推广应用领域”等部分，明确将水泥混凝土路面板底脱空纳入本研究成果的应用场景。

大纲评审委员会专家（签字）：

项目负责人（签字）：