

项目合同编号：25-29K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究

承担单位：长安大学

项目负责人：刘喜

通讯邮编、地址：710064、陕西省西安市碑林区南二环路中段

传真、电话：029-61105261

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：25-29K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究

承担单位：长安大学

项目负责人：刘喜

通讯邮编、地址：710064、陕西省西安市碑林区南二环路中段

传真、电话：029-61105261

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. 研究内容

本项目拟将理论推导、试验研究、数值模拟相结合，开展高延性地聚物复合材料研发与应用研究，以达到提升基础设施服役性能与使用寿命、推动绿色可持续交通发展的目的，助力实现“碳达峰、碳中和”，拟开展研究与开发内容具体包括：

(1) 高延性地聚物复合材料（SHGC）裂缝发展机制与微观力学模型

开展高性能地聚物砂浆基体性能调控方法研究，分析前驱体（粉煤灰、矿渣、硅灰）、碱激发剂（模数）等主要因素对材料断裂韧度、弹性模量等微观力学参数影响规律，基于 SEM、XRD、MIP 等技术明确地聚产物的物相组成及微观结构，揭示微观结构与性能的内在联系，建立高性能地聚物砂浆基体微观力学性能调控方法；

开展 SHGC 开裂桥接应力模型研究，完成纤维（PVA、PE）与地聚物基体粘结性能试验与桥接应力试验，基于单根纤维拔出力-位移曲线确定界面微观力学参数，明确纤维-基体界面微观结构与物相组成对裂缝桥联行为的影响规律，揭示基体组成对纤维粘结性能的影响机制，建立基于微观力学的 SHGC 内部桥接应力计算模型。

(2) 高延性地聚物复合材料的跨尺度计算模型与强韧化设计方法

开展 SHGC 应变硬化性能跨尺度计算模型研究，完成试件宏观力学性能试验，分析单轴作用下裂缝开展数量与宽度，明确不同微观力学参数下试件初裂强度、极限拉伸应变和极限拉伸强度，基于断裂力学理论揭示多缝开裂的物理数学逻辑，综合建立“微观力学参数-单缝开裂性能-多缝开裂行为”的 SHGC 跨尺度计算模型；

完成“引入再生混凝土缺陷”作用下 SHGC “微—细—宏”观

性能研究，联合 CT 技术与图像处理方法获取基体初始缺陷尺寸、分布、形状等参数，基于 SHGC 跨尺度计算模型完成不同缺陷分布的材料参数化分析，明确缺陷尺寸要素与宏观性能的细观尺度联系规律，建立考虑缺陷最优分布的 SHGC 强韧化设计方法。

(3) 基于服役性能的 SHGC 功能梯度加固受弯构件设计方法

开展高延性地聚物功能梯度加固梁受弯性能试验研究，观察不同影响因素下试件的破坏模式和破坏过程，建立考虑统计分布的随机宏观分析单元，明确该类构件刚度退化规律与破坏模式界限特征参数，给出不同破坏模式下的功能梯度地聚物受弯构件承载力计算模型；

基于应力平衡和变形协调条件建立挠度与裂缝宽度计算模型，定量描述各影响因素对该类构件服役性能的影响规律，建立正常使用极限状态下该类构件的强度利用程度量化分析体系，统一承载力极限状态与正常使用极限状态性能指标，提出基于服役性能的高延性地聚物受弯构件功能梯度加固设计方法。

(4) SHGC 工程应用技术与施工工艺研发

结合 G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段桥梁、隧道、路面等具体工程场景，研发 SHGC 材料的配套应用技术，包括材料现场拌制工艺、浇筑/铺设工艺、养护工艺、与原有结构的界面处理工艺等。编制施工技术指南，明确材料的适用范围、施工流程、质量控制标准、验收指标等，为工程实际应用提供标准化指导。在依托工程开展试点应用，通过现场监测验证 SHGC 材料与应用技术的有效性，优化施工工艺，形成可复制、可推广的工程应用方案。

2. 技术关键

该研究围绕高延性地聚物复合材料（SHGC）的性能优化与工程应用，核心聚焦以下关键科学问题，旨在突破技术瓶颈、完善理论体系并支撑实际工程落地：

(1) 多因素调控下 SHGC 的微观机制与性能关联问题

前驱体（粉煤灰、矿渣、硅灰）、碱激发剂（模数）等组分参数对 SHGC 断裂韧度、弹性模量等微观力学性能的影响规律尚不明确，需揭示多元体系碱激发反应机制，明确地聚产物物相组成、微观结构与宏观性能的内在关联。纤维（PVA、PE 等）与地聚物基体的界面作用机制模糊，纤维-基体界面微观结构、物相组成对裂缝桥联行为的影响规律未知，需厘清基体组成对纤维粘结性能的调控机制，解决界面粘结与纤维利用率优化的核心矛盾。

(2) SHGC 应变硬化的跨尺度计算与强韧化设计问题

缺乏“微观力学参数-单缝开裂性能-多缝开裂行为”的跨尺度关联模型，难以通过微观参数精准预测材料宏观应变硬化特性，需基于断裂力学理论揭示多缝开裂的物理数学逻辑。再生混凝土缺陷（尺寸、分布、形状）对 SHGC “微—细—宏”观性能的影响规律不明，需建立考虑缺陷最优分布的强韧化设计方法，解决缺陷调控与材料强度、延性协同优化的难题。

(3) SHGC 功能梯度加固构件的服役性能与设计方法问题

高延性地聚物功能梯度加固梁的破坏模式、刚度退化规律及界限特征参数尚未明确，不同影响因素（功能区高度、SHGC 性能、

配筋形式)对构件受弯承载力的耦合作用机制需量化分析。缺乏统一承载力极限状态与正常使用极限状态的性能指标体系,需建立挠度与裂缝宽度计算模型,提出基于服役性能的加固设计方法,解决功能梯度结构协同工作与长期服役稳定性问题。

(4) 固废资源化与材料性能、工程应用的协同适配问题

如何通过固体废弃物(粉煤灰、矿渣、废旧混凝土等)的定向优化处置,在提升固废综合利用率的同时,保证 SHGC 的超快硬化、超高延性等核心性能,满足桥梁、隧道修复的工程需求。

3. 依托工程(依托工作)

该工程项目应用单位经营范围广泛,能满足项目实施所需的研发条件和经费保障。本项目依托 G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段(K910+600-K946+585)专项维修整治工程, G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段(K910+600-K946+585)桥梁共计 55 座(单幅),累计长度 15443.69m,隧道共计 26 处,累计长度 43498.50m(上下行)。养护路段内共包含 6.9 公里的水泥混凝土桥面与 60 余处隧道衬砌板,混凝土受弯区存在不同程度的断裂、破碎板、反复坑槽、露筋等病害,需要根据病害发展程度对其采取局部修复或整跨、整联处治后重新浇筑,彻底治理。同时混凝土破损处进行铣刨、凿除会产生较多的废旧材料,采用合适的路面再生材料利用技术和工艺是本项目的重难点。

二、考核指标

1. 预期目标

本项目拟将理论推导、试验研究、数值模拟相结合，开展高延性地聚物复合材料研发与应用研究，以达到提升基础设施服役性能与使用寿命、推动绿色可持续交通发展的目的，助力实现“碳达峰、碳中和”，预期达到以下目标：

(1) 提出一种高延性地聚物复合材料跨尺度计算方法；

(2) 提出一种基于微观力学模型的高延性地聚物复合材料性能设计方法；

(3) 提出一种基于服役性能的功能梯度受弯构件加固设计方法。

2. 主要技术经济指标（具体的技术经济参数）

(1) 揭示多元体系碱激发反应机制，明确前驱体配比、碱激发剂参数等对高延性地聚物复合材料（SHGC）微观结构与宏观性能的关联规律，建立 SHGC 基体性能调控方法，使材料抗压强度超 100MPa、抗拉强度超 10MPa、拉伸延性超 10%。

(2) 构建“微观力学参数-单缝开裂性能-多缝开裂行为”的跨尺度计算模型，预测误差控制在 10%以内；建立考虑再生混凝土缺陷最优分布的强韧化设计方法，实现材料强度与延性协同优化。

(3) 突破仅针对受弯构件的研究局限，拓展至桥梁、隧道、路面、管廊等多类工程场景，形成高延性地聚物功能梯度结构设计方法，明确破坏模式界限特征参数，建立承载力、挠度及裂缝宽度计算模型，编制完成高延性地聚物复合材料工程相关施工技术指南。

3. 经济和社会效益

(1) 经济效益

材料成本优化：研发的全固废基高延性地聚物复合材料（SHGC）通过固废资源化利用，有效降低原材料采购与生产成本，相较于传统高延性水泥基复合材料具备显著价格优势，可为工程建设与养护项目节约材料投入。研发的全固废基 SHGC 材料成本较传统高延性水泥基复合材料降低 20%以上，单公里路面修复可节约材料成本 20%以上，单座中小桥梁补强可节约材料成本 15%以上。

运维成本降低：凭借优异的力学性能与耐久性，SHGC 材料能大减少后续维修、翻新的频次与规模，降低全生命周期运维投入，使交通基础设施服役寿命延长 20 年以上，工程全生命周期运维成本降低 30%以上。

(2) 社会效益

保障交通运行安全：通过改善交通工程结构的抗裂性、承载力与耐久性，减少桥梁、隧道等关键设施的病害风险，降低交通中断与安全事故发生概率，为公众出行与货物运输提供更可靠的保障。

推动行业技术进步：构建的 SHGC 材料研发、设计与应用技术体系，填补相关领域技术空白，为交通基础设施绿色建造与加固改造提供新路径，引领行业向高性能、低损耗方向转型。

强化人才与技术储备：培养 5 名高层次复合型科研与工程技术人才，为交通领域绿色发展提供智力支撑；形成的技术成果与工程经验可作为同类项目的参考范例，提升行业整体技术水平。

4. 成果提供形式

(1) 发表学术论文 3 篇，其中 SCI 索引 2 篇、EI 索引 1 篇。

(2) 申请发明专利 2 项、实用新型专利 2 项，形成具有自主知识产权的核心技术体系。

(3) 编制并提交《高延性地聚物复合材料工程施工技术指南》

5. 其它考核指标

培养高层次人才 5 名，组建一支兼具材料研发与工程应用能力的专业团队，参加学术会议和技术交流共 8 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）
2026.03~ 2026.06	2025 年第二季度： 检索、收集国内外相关文献，省内外调研，撰写项目可行性研究报告，完成项目的立项工作，编写研究大纲和工作实施详细计划。
2026.07~ 2026.09	2026 年第三季度： 1. 完成地聚物砂浆力学性能及微观结构试验； 2. 完成高性能地聚物砂浆基体性能调控方法； 3. 开展纤维-基体粘结性能试验与桥接应力试验； 4. 技术交流 3 次，申请专利 1 项。
2026.10~ 2027.06	2026 年第四季度至 2027 年第二季度： 1. 建立基于微观力学的 SHGC 内部桥接应力计算模型； 2. 完成高延性地聚物复合材料宏观力学性能试验； 3. 建立 SHGC 跨尺度计算模型； 4. 完成“引入再生混凝土缺陷”SHGC 性能试验； 5. 技术交流 2 次，申请专利 2 项，发表论文 2 篇。
2027.07~ 2027.09	2027 年第三季度： 1. 建立考虑缺陷最优分布的 SHGC 强韧化设计方法； 2. 完成高延性地聚物功能梯度加固梁受弯性能试验； 3. 形成高延性地聚物受弯构件功能梯度加固设计方法； 4. 技术交流 3 次，申请专利 1 项，发表论文 1 篇。
2027.10~ 2028.03	2027 年第四季度至 2028 年第一季度： 撰写研究报告及技术指南，项目总结验收。

四、项目经费

项目总经费：49.98 万元
交通运输厅补助：19.98 万元
自筹资金：30.0 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	41.08	18.08
1. 设备费	5.0	0
(1) 购置设备费	5.0	0
(2) 试制设备费	0	0
(3) 设备改造与租赁费	0	0
2. 业务费	27.28	13.28
(4) 材料支出	19.68	7.68
(5) 测试化验实验加工支出	3.8	1.8
(6) 燃料及动力支出	0	0
(7) 差旅支出	0.8	0.8
(8) 会议支出	0.2	0.2
(9) 国际合作与交流支出	0.2	0.2
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	2.6	2.6
(11) 其他支出	0	0
3. 劳务费	8.8	4.8
(12) 劳务性支出	8.0	4.0
(13) 咨询专家支出	0.8	0.8
(二) 间接费用	8.9	1.9
4. 管理费	4.9	1.9
5. 绩效支出	4.0	0
合 计	49.98	19.98

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）	4
		（1）授权发明专利	2
		（2）实用新型	2
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	3
		（1）其中 SCI 索引收录数	2
		（2）其中 EI 索引收录数	1
		（3）其他	0
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2.获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3.其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（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	
		（2）中试（样品样机）	
		（3）小批量	
		（4）规模化生产	
	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	5
		（1）博士、博士后	1
		（2）硕士	4
		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	
	产业化情况	1. 开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2. 科研仪器设备利用率（%）	
		3. 孵化科技型企业（个）	
		4. 转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

1. 长安大学

- (1) 负责项目的申报、组织协调以及整体技术把关；
- (2) 负责依托工程的协调和落实；
- (3) 负责科研报告、论文专利的编写工作；
- (4) 项目的室内试验、感知测试、耐久性试验提供试验设备；
- (5) 负责项目的课题鉴定。

2. 陕西西公院工程试验检测有限公司

- (1) 负责提供试验路段，协调配合现场试验；
- (2) 项目的室内试验、感知测试、耐久性试验提供试验设备；
- (3) 配合长安大学进行课题鉴定。

3. 陕西交控运营管理有限公司

- (1) 项目前期研究现状资料的收集；
- (2) 项目报告和科研成果的科技查新工作；
- (3) 负责科研报告、论文专利的编写工作；
- (4) 配合长安大学进行课题鉴定。

4. 中建六局第一建设有限公司

- (1) 负责科研报告、论文专利的编写工作；
- (2) 配合长安大学进行课题鉴定。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学						
参与单位（排序）：陕西西公院工程试验检测有限公司、陕西交控运营管理有限公司、中建六局第一建设有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中的具体工作
1	刘喜	1986-12-05	长安大学	副高级	结构工程	项目负责人
主要研究人员						
2	吴涛	1976-09-01	长安大学	正高级	结构工程	项目总体指导
3	赵佳	1987-03-24	陕西西公院工程试验检测有限公司	副高级	桥梁工程	研究方案指导
4	王磊	1982-09-08	陕西西公院工程试验检测有限公司	副高级	道路工程	组织科研课题实施
5	王力	1984-08-03	陕西西公院工程试验检测有限公司	副高级	交通工程	科研试验工程应用
6	雷晓峰	1974-10-30	陕西西公院工程试验检测有限公司	正高级	隧道工程	理论模型推导
7	祁春辉	1993-01-18	陕西交控运营管理有限公司	工程师	道路工程	理论模型推导
8	涂智能	1996-01-24	陕西西公院工程试验检测有限公司	工程师	环境科学与工程	试验方案设计

主要研究人员								
9	白梅力	1983-09-16	陕西西公院工程试验检测有限公司	副高级	土木工程	试验方案设计		何梅
10	何康	1993-07-23	中建六局第一建设有限公司	副高级	建筑与土木工程	科研试验工程应用		何康
11	付颖嘉	1990-02-24	陕西西公院工程试验检测有限公司	助理工程师	道路工程	试验方案设计		付颖嘉
12	汪明磊	1998-10-23	长安大学	技术员级	结构工程	理论模型推导		汪明磊
13	李明轩	1998-03-28	长安大学	技术员级	结构工程	试验方案设计		李明轩

八、信息表

项目合同编号	25-29K	密级	/	A: 机密 B: 秘密 C: 内部						
项目名称	高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究									
项目实施所在地	陕西省		起止年限	2026 年 03 月至 2028 年 03 月						
总 经 费	49.9800 万元		厅 拨	19.9800 万元						
第一承担单位	单位名称	长安大学								
	所在地	陕西省西安市碑林区						代码	610103	
	通讯地址	西安市南二环路中段						邮编	710061	
	单位性质	(1) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他						代码	10710	
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	陕西西公院工程试验检测有限公司								
	2	陕西交控运营管理有限公司								
	3	中建六局第一建设有限公司								
项目负责人	姓 名	刘喜	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.其他								
	职 称	(1) 1.高级 2.中级 3.初级 4.其他								
	联系电话	13474164427			电子邮箱	lliuxii@163.com				
项目联系人	姓名	刘喜			性别	男				
	联系电话	13474164427			电子邮箱	lliuxii@163.com				
项目组人数	13	高级	8	中级	2	初级	3	其他	0	
主要研究内容 (100 字以内)	本项目聚焦高延性地聚物复合材料,开展微观力学模型、跨尺度计算模型与强韧化设计方法、功能梯度加固受弯构件设计方法研究,助力绿色交通与双碳目标。									
成果属性	A、C	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他								
成果形式	A、F	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 9 份，甲方单位伍份，承担单位 4 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）

李涛

2026年3月27日

联系人：（签字）

张喆

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）

长安大学

单位负责人：（签字）

陈永

2026年3月27日

项目负责人：（签字）

刘喜

（公章）

电 话：

财务负责人：（签字）

师艺

账 户 名：长安大学

开户银行：中国银行西安翠华路支行

账 号：102007335073

陕西交通科技项目科研诚信 承诺书

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

项目承担单位（盖章）

项目负责人：刘喜

年 月 日

项目编号：25-29K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：高延性地聚物复合材料性能与
应用关键技术研究

申请单位：长安大学

联系人：刘喜

电 话：13474164427

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

应用技术、信息化类及软科学类

编写主要内容

一、项目研究的背景和必要性

《绿色交通“十四五”发展规划》系统性地指出交通运输基础设施建设在新形势下的发展要求，强化了资源要素节约集约利用，推动了交通运输绿色低碳转型，大幅提升交通运输高质量发展水平。在“双碳”目标和可持续发展重大战略背景下，随着城镇化水平提高以及“一带一路”的规划与实施，我国交通运输领域基础设施建设规模不断扩大，持续完善和提升新时代下交通运输领域工程结构的服役性能与使用寿命，是实现交通系统绿色建造、安全使用和低碳运维的重要途径。

桥梁工程、地下工程、港运工程等大型生命线工程结构在使用过程中受到外部荷载与环境侵蚀共同作用，混凝土在复杂应力与环境作用下不可避免出现损伤，导致结构的耐久性和承载力下降，传统混凝土受拉脆性显著，裂缝发展难以控制，严重影响结构的安全性及使用寿命。高延性水泥基复合材料(Strain Hardening Cementitious Composites, SHCC)可以显著改善混凝土材料脆性，提升结构抗灾变能力，将为混凝土材料的固有问题提供了一个新的解决策略。然而高性能的需求一方面迫使组分中骨料使用减少、水灰比降低，造成高耗能、高排放的水泥用量增加，另一方面高性能纤维的使用成本较高，使得材料造价大幅提升，两方面综合产生的经济和环境负担共同制约其进一步发展。

碱激发技术可以将工业废物和副产品转化为碱激发材料 (Alkali-activated Materials, AAMs)，能够有效代替水泥胶凝材料。同时 AAMs 具有抗腐蚀、耐火等优势，且与水泥胶凝材料具有相似的脆性特性，亦可通过掺入纤维进行增韧改性。以此制备高延性地聚物复合材料 (Strain Hardening Geopolymer Composites, SHGC)，从微观力学层面进行设计，明确纤维、基体、界面各相性能调控机制，提升材料经济性与环境效益，可实现 SHGC 的高效、绿色、经济使用，并保障服役期内混凝土结构的安全性、适用性与耐久性。在国家推动“双碳”目标进程中，大力推进低碳碱激发复合材料的发展与应用，开展高延性地聚物复合材料微观机制与宏观性能的跨尺度研究，并结合公路桥梁、隧道衬砌、路面修复等具体工程场景开展应用技术研发，对于促进该类高性能材料的工程化推广和实际应用具有重要的理论意义和实用价值。

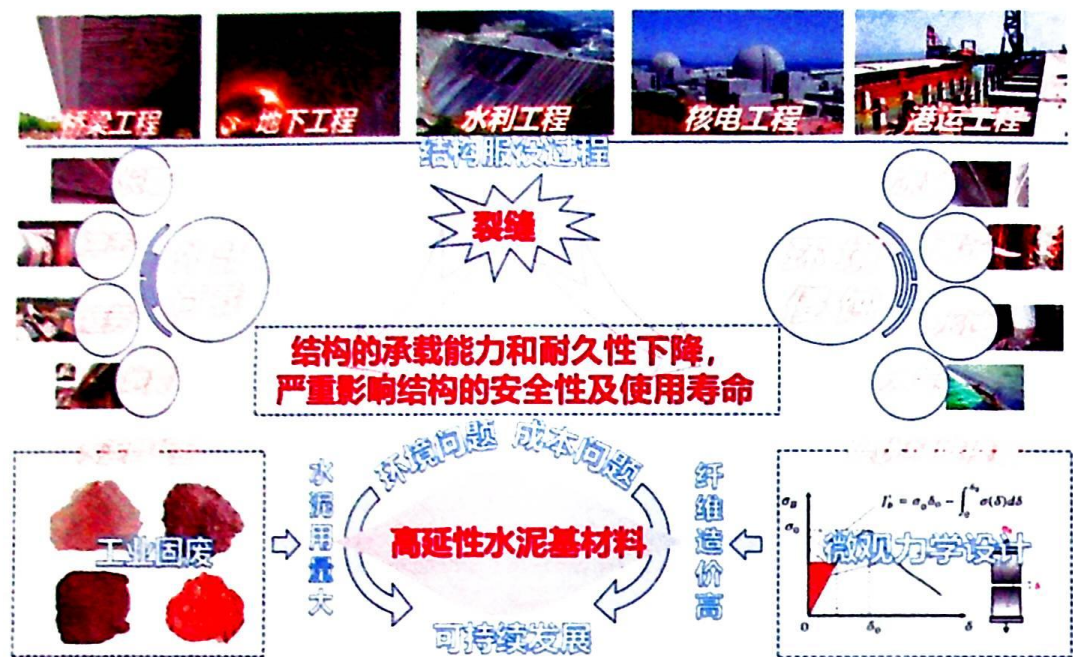


图1 传统混凝土与高延性水泥基材料存在的问题

纤维与基体之间的粘结作用是影响 SHCC 力学性能的关键因素，基于断裂力学与微观力学的物理模型已被广泛应用于 SHCC 的设计中，这一可被设计的特点使其成为工程水泥基复合材料（ECC）。相较于水泥基材料水泥水化反应，AAMs 是由碱金属源(碱激发剂)与固体硅酸铝粉末(前驱体)缩聚反应而得，不同前驱体和碱激发剂反应的产物 N-A-S-H、C-A-S-H 性质更为复杂，复合材料中基体相、纤维-基体相的微观力学参数影响机制仍不明晰，导致纤维基体间作用的微观力学模型适用性有待进一步完善。因此明确纤维、基体、界面各相性能调控机制，基于微观力学模型的计算结果调控各相材料性能参数是赋予材料优异力学性能和良好经济效益的关键。

综上，本项目聚焦材料特性创新、理论体系完善、工程应用落地三大核心，紧密对接投标文件研究内容，拟开展高延性地聚物复合材料微观力学设计理论、性能调控技术与多场景新型结构应用体系研究，揭示碱激发反应机制、纤维基体微观结构与材料宏观性能的联系；开展材料微观力学参数与宏观性能系列试验研究，建立高延性地聚物复合材料微观力学模型，进一步基于微观力学模型建立应变硬化过程的跨尺度计算模型，明确材料细观力学参数与宏观性能之间的关联规律，指导材料性能的设计与优化；同时结合具体工程场景研发配套应用技术与施工工艺，形成施工技术指南，为工程实际应用提供全方位支撑，研究成果对于实现新型材料设计、优化、制备的全流程创新，推动高延性地聚物复合材料的规模化工程应用具有重要意义。

二、前期科研及工作基础

1. 对项目领域国内外（省内外）研究现状，研究水平和发展趋势的分析和评价

1.1 高延性地聚物复合材料研究动态

在新型工程材料的领域中，应变硬化纤维增强复合材料的稳定性对于其结构应用至关重要。与传统水泥基复合材料不同，地聚物反应机理更为复杂，组成前驱体的固体废弃物来源广泛、成分差异较大，缺乏对纤维增强地聚物的精细化与标准化设计，不利于基于材料特性和性能指标的高延性地聚物复合材料标准制定，限制了其推广应用。

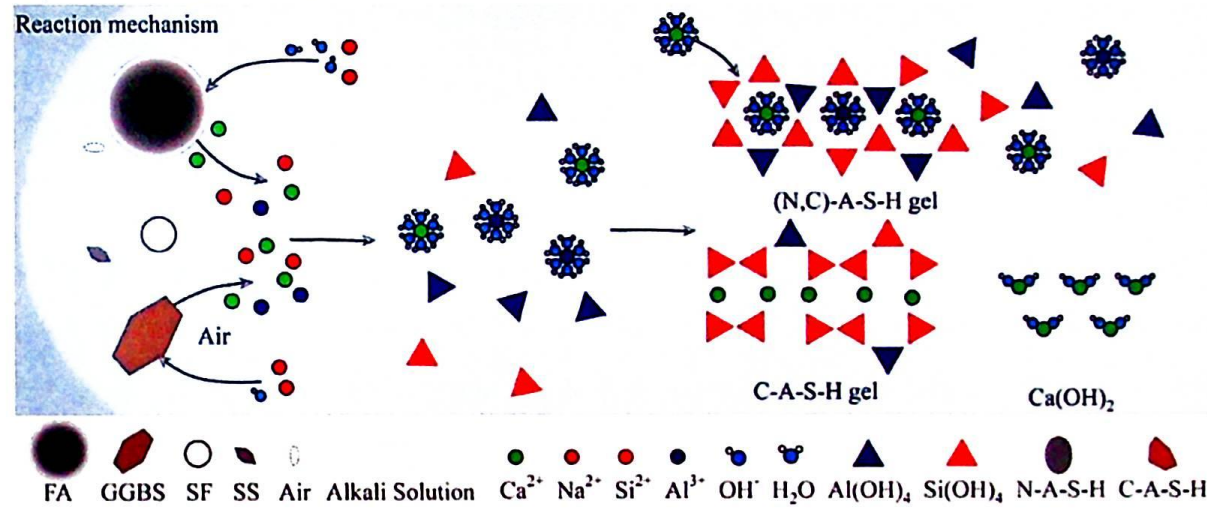


图2 碱激发反应机制

高延性地聚物复合材料的力学性能与工作性能受水胶比^[1-3]、碱激发剂种类^[4-6]与含量^[7]、体系钙含量^[8, 9]、纤维种类与掺量^[10-15]等多重因素影响，水胶比可以通过影响反应速率来提升工作性能^[2]，碱含量在一定程度上会影响碱激发反应的速率^[7]，体系钙含量是决定反应产物的一个重要因素^[8]，已有学者分别针对粉煤灰^[16]、矿渣^[17, 18]、硅灰^[19]、沸石^[20]等钙硅化合物为前驱体开展研究，研究表明碱激发反应产物根据前驱体中钙含量不同可为层状结构的水化硅（铝）酸钙（N,C）-A-S-H和网状结构的水化硅铝酸钙（N-A-S-H），其中（N,C）-A-S-H具有更加致密的结构，其强度与弹性模量均高于低密度的N-A-S-H。因此前驱体的选择在地聚物复合材料的力学性能上发挥关键作用。目前中国年产生粉煤灰（燃煤燃烧产生的固体废物）8.5亿吨，其利用率为75%左右，仍然具有提升空间，根据其氧化钙含量，粉煤灰可以被分类为高钙粉煤灰（HFA）和低钙粉煤灰（LFA），通过调节两者的比例来控制体系钙含量实现不同性能的需求^[21]。选择粉煤灰作为前驱体成为制备高性能地聚物复合材料的最佳选择之一。

表 1 纤维相关参数对 SHGC 单轴拉伸性能的影响

变量	作者	时间	研究结论
纤维类型	Alrefaei 等 ^[23]	2018	指出在相同纤维体积分数情况下, 钢纤维比 PE 纤维抗拉强度高 9%至 26%, 但 PE 纤维 EGC 的拉伸应变比钢纤维高 3.5 倍。
	Nematollahi 等 ^[24]	2017	发现 PE 纤维与 PVA 纤维相比, EGC 的拉伸应变高约 16%, 但抗拉和抗压强度低约 8%至 9%。
	Farooq 等 ^[25]	2019	研究了 PVA 纤维、PP 纤维、高强钢纤维和短切钢丝绒增强粉煤灰基 SHGC 的应变硬化行为。前三种纤维 EGC 具有高延展性, 由于低模量 (3-4GPa) 和极高的断裂伸长率 (25%), PP-SHGC 在 0.5-0.7 MPa 的低抗拉强度下具有较高的应变值。
	Khan ^[26]	2022	比较了用 PVA、PP 和 PET 纤维制备的 EGC 的力学性能, 结果表明 PVA 纤维的性能最好, 其次是 PET。与 PP 和 PET 纤维相比, PVA 纤维的拉伸强度、拉伸应变和弯曲强度提高。
	Trindade 等 ^[27, 28]	2019 2021	发现 PE 纤维的弯曲和拉伸强度分别比 PVA 纤维高约 23%和 5%, 拉伸应变相当。PBO 纤维的弯曲和拉伸强度分别比 PE 和 PVA 纤维高出 30%和 14%, 但拉伸应变降低了 28%。
纤维掺量	Nematollahi ^[1]	2017	PE 含量为 1%时, 拉伸强度与应变增加, 超过 1%时开始下降。
	Choi 等 ^[29, 30]	2015 2021	研究报告 PVA 纤维体积分数从 1%增加至 2%, EGC 流动性降低; 增加 PE 纤维含量会提高 EGC 的拉伸强度和应变; 添加 PE 纤维或增加其在 EGC 中的含量对抗压强度无显著影响。
	Al-Majidi 等 ^[31]	2017	PVA 纤维对 EGC 的抗压强度无显著影响, 但显著改善弯曲变形能力; PVA 纤维体积分数在 1%-2%增加可使 EGC 的拉伸强度增加; 在 EGC 中加入钢纤维可提高抗压强度约 15-25MPa。

高性能纤维是复合材料在裂缝产生后继续保持应力状态的关键, 最初采用高强高弹性模量聚乙烯 (Polyethylene, PE) 纤维制备, PE 纤维具有优异的强度与韧性, 但由于其疏水特性, 在与基体的粘结中可能存在纤维利用率不足的情况, 因此目前针对 PE 纤维增韧地聚物复合材料的研究中, 学者更多的关注如何提升 PE 纤维与基体的粘结性能^[22, 23]。除此之外亲水性的 PVA 纤维也被广泛应用于高延性地聚物复合材料的设计中, 然而由于其亲水特性, 表面更易与碱激发产物产生化学胶结力, 研究表明过强的化学胶结力在很大程度上提高了纤维的断裂概率, 从而导致材料宏观拉伸延性不足^[24]。除此之外, 部分学者针对低成本纤维聚对苯二甲酸乙二酯纤维 (PET)、聚对苯撑苯并二噁唑纤维 (PBO)、聚丙烯纤维 (PP) 增韧地聚物基复合材料^[25-28]展开研究, 具体研究结论见表 1。综上, 各纤维的成本为 PE>PVA>PBO>PET/PP, 根据实际的需求选择合适的纤维能够保证经济性, 不同纤维在提升复合材料性能方面仍然有优化空间, 如何合理的通过提升纤维使用效率来降低纤维使用量成本是需要解决的共性问题。

1.2 基于微观力学的纤维增韧高延性混凝土复合材料设计方法研究

高延性混凝土复合材料由韧性纤维与脆性基体组成,复合材料的破坏一般先从脆性基体材料的缺陷裂纹处开裂开始,随着服役过程中裂纹会不断张开和扩展,基体中广泛分布的桥联韧性纤维将起到阻碍作用,使其在开裂后承载力仍然保持继续增长的趋势,这一应变硬化行为主要由韧性纤维影响的桥联性能与基体缺陷造成的多裂缝发展行为共同决定。

纤维-基体的界面特性是桥联性能的主要影响因素,其对纤维增强水泥基复合材料的断裂韧性、抗拉强度、抗折强度和延性有着重要影响, Li 等^[32]建立了表征单纤维拔出界面力学特性的细观力学模型,同时考虑了纤维断裂和纤维强度折减^[32, 33],推导了基于单丝拔出模型和纤维随机分布的复合材料桥接应力与裂纹张开宽度本构关系,并且建立了亲水纤维的粘结计算模型,在此理论基础上,为降低纤维成本采用 PVA 纤维表面涂敷油膜技术以降低亲水纤维化学胶结力,使得低造价的 PVA 纤维得以广泛应用。Yang^[34]在前人简化的模型基础上,引入了纤维双向脱粘和拔出、基体微剥落和 Cook-Gordon 效应等纤维与基体相互作用的新机制,提出了一个将材料组成参数与复合材料性能联系起来的应变硬化水泥基材料纤维桥联 σ - δ 模型。Huang^[35]在 Yang 研究的基础上通过对纤维断裂(包括纤维拔出阶段的脱粘断裂和滑移断裂)的分析,提出了包括脱粘断裂和滑移断裂的纤维桥联 σ - δ 模型,模型精确度得到进一步提高,模型预测结果与试验结果对比如图 3 所示。然而在 Huang 模型中,在进行滑移断裂分析中忽略了脱粘阶段已存在的裂缝宽度 δ_0 ,使得模型对纤维滑移断裂的评价出现一定偏差。

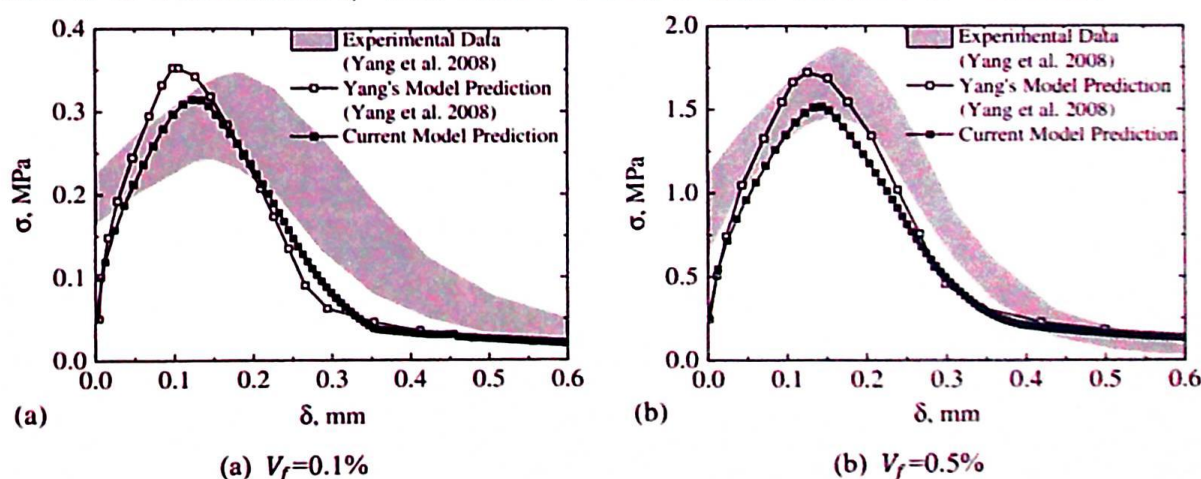


图3 Huang改进的 σ - δ 模型结果与试验结果对比^[35]

对于多裂缝发展行为,学者们采用多种数值方法模拟高延性水泥基材料(SHCC)的拉伸应力-应变曲线, Wu 等^[38]利用蒙特卡洛随机过程模拟 ECC 多

缝开裂过程,成功预测 ECC 材料的拉伸强度和平均裂缝间距。但该模型仅可对 ECC 材料的宏观拉伸指标进行预测,无法真实描述 ECC 材料多缝开裂过程。Lee 等^[39]模拟了 PVA 纤维 ECC 材料的单轴拉伸行为,利用纤维的倾斜角度来衡量不同截面纤维桥接能力的差异性,将单缝桥接曲线简化为多折线,并基于图像处理计算裂缝间距分布。但是,该理论较为粗略,与试验结果存在较大出入。然后, Lu 和 Leung 等先后使用解析方法^[40]和数值方法^[41],分析 ECC 受拉构件内部的应力传递形式,成功模拟 ECC 材料开裂过程,模拟结果与试验结果较为一致。Li 和 Yang 等^[42]提出基于细观力学的随机模型,考虑基体、纤维和纤维/基体界面粘结性能的变异性,并通过稳态开裂分析、应变硬化准则和应力传递长度来确定多缝开裂的产生。不仅实现 ECC 材料的多缝开裂模拟,还从理论上解释 ECC 多缝开裂存在离散性的原因。

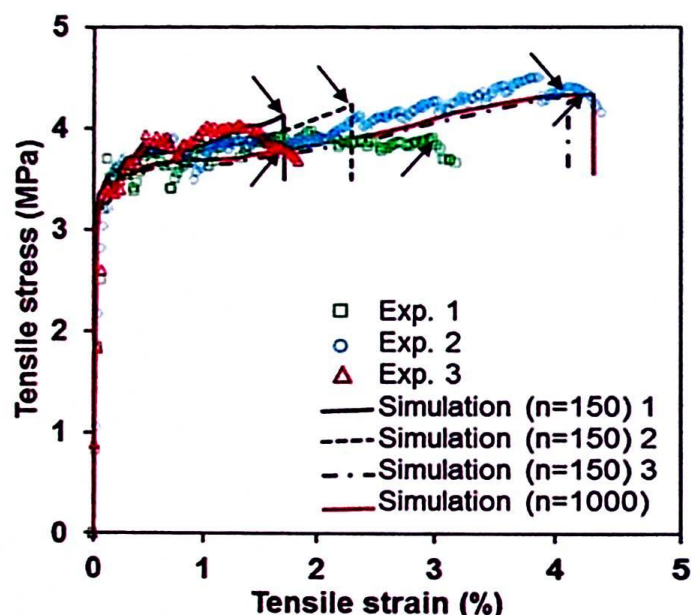


图4 单轴拉伸应力-应变曲线模拟与试验结果^[42]

针对应变硬化地聚物基复合材料,前驱体反应机制相较于水泥水化反应更为复杂,不同产物组分对于纤维的粘结作用存在较大差异。研究表明,通过掺入高炉矿渣来增加前驱体中的 CaO 含量可以有效提升基体抗压与抗拉强度,然而相较于粉煤灰体系的地聚物复合材料延性大幅下降,部分学者针对这一现象展开研究,认为不同碱激发产物会对纤维的粘结性能产生较大的影响,当前驱体使用高钙碱激发胶凝材料,例如高炉矿渣、高钙粉煤灰^[17, 43, 44]时,产物中 C-A-S-H 含量大幅增加,复合材料的强度提升、延性下降,使用低钙碱激发胶凝材料作为前驱体时,产物中 N-A-S-H 占主要成分,复合材料的强度与延性表现出截然相反的行为。进一步通过微观力学试验发现 N-A-S-H 相较于 C-A-S-H 与亲水纤维的

化学胶结力更低，高钙体系中纤维在拔出的过程中由于较高的化学胶结力，在脱粘过程中纤维更易断裂，难以在开裂后更好的发挥作用，低钙体系中有较多的纤维的进入物理摩擦阶段，无法充分利用纤维的强度。因此为充分发挥纤维性能，保证强度与延性能满足要求，有必要对碱激发的反应机理与纤维界面粘结性能进行更为系统的研究。

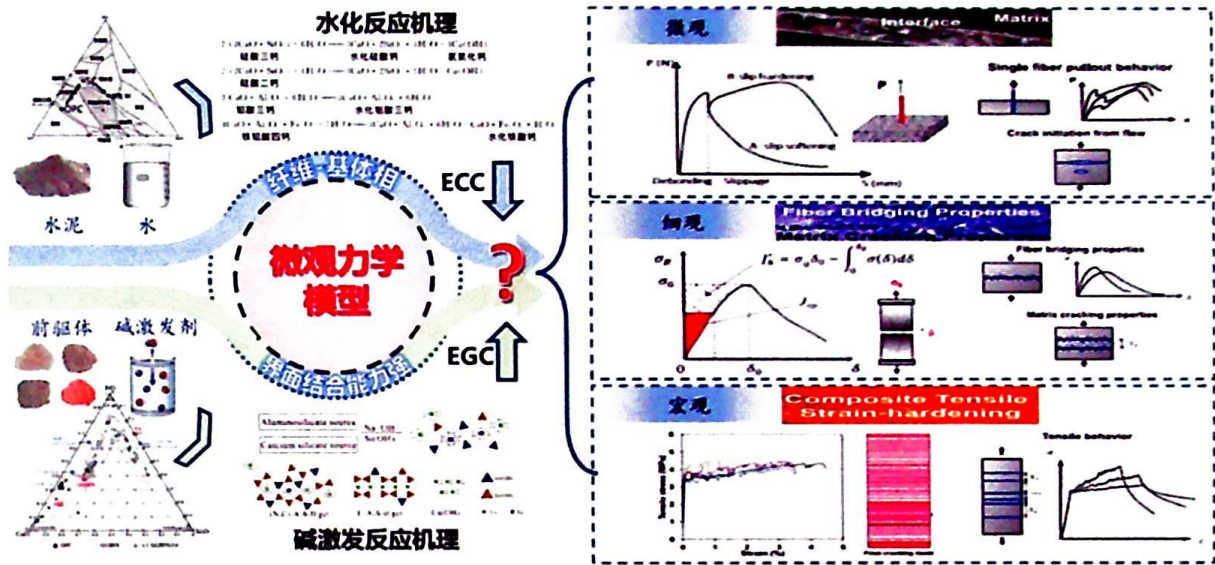


图5 基于微观力学的SHCC多尺度数值计算模型研究

综上，纤维增韧高延性混凝土复合材料设计基础是基于纤维、基体和界面三者间的力学相互作用机制，并由此实现拉伸过程中的多缝开裂，目前基于断裂力学与微观力学的物理模型已被广泛应用于应变硬化复合材料的设计中，明确纤维、基体、界面各相性能调控机制，基于微观力学模型建立跨尺度计算模型，指导各相部分性能参数调控是赋予材料优异力学性能和良好经济效益的关键。

1.3 应变硬化纤维复合材料强韧化研究现状

SHCC 力学性能由纤维，基体和纤维/基体的界面三者之间共同决定^[45, 46]。基体方面：可通过优化材料配合比，改善骨料间的堆积方式等传统的调节基体性能的方式，但是这类方式调节的范围往往有限，因此也有通过在基体中添加纳米材料，聚合物，人工缺陷粒子，微胶囊等方式调节基体的水化速度、水化产物结构、缺陷的数量与分布、干燥收缩性能，进而设计基体的宏观性能^[47-50]。界面方面：可以提前对纤维表面进行各种物理化学改性，进而提高纤维与基体间的机械咬合力，或者化学粘结力，也有通过对基体进行改性，使基体更加密实的同时，间接提高纤维与基体之间的界面摩擦力^[51-54]。因此明确不同改性条件下的微观力学影响机制，基于微观力学理论从多方面出发完成基体、界面改性设计，实现SHCC的韧性、强度性能提升。

SHCC 所独有的多缝开裂应变硬化特征是纤维与基体共同作用的结果。通过合理的基体改性手段,调整基体的强度,弹性模量,断裂韧度以及基体中初始的缺陷尺寸与分布,能够调整 SHCC 裂缝数量与宽度,提高开裂稳定性。随着 SHCC 设计理论的发展完善,学者意识到基体中预先存在的缺陷是影响材料韧性的关键因素。Li 等^[55]提出了通过设计 SHCC 基体中预先存在的缺陷的方法,来调节 SHCC 的饱和开裂潜力进而提高材料的韧性。通常来说能够作为人工缺陷的材料包括塑料粒子,轻质骨料,强度较低的聚合物材料,废弃橡胶粉颗粒等。Li 从 SHCC 的设计准则出发,根据强度准则对开裂强度的要求由最大纤维桥接应力确定了临界缺陷尺寸的最小值。然后根据缺陷尺寸的要求,选用了聚丙烯塑料粒子和轻质骨料苏长岩两种材料来调节基体性能。结果表明使用两种缺陷粒子改性后,SHCC 的极限拉应变分别提高了五倍和两倍。试件从难以出现多缝开裂的破坏模式,变成了具有饱和裂缝的破坏模式,同时对材料的开裂强度和抗拉强度没有显著影响,通过类似的思路 Zhigang Zhang 等^[56]将蛭石和玻化微珠作为人工缺陷引入到高强度的 PE 纤维增强 SHCC 中。结果表明人工缺陷的引入会小幅度的降低 SHCC 的抗压和抗拉强度,降低后的抗拉强度仍然超过 60MPa。同时单丝拔出试验的结果还表明,引入人工缺陷会小幅度的降低纤维与基体的界面粘结强度。但是材料的拉伸应变得到了大幅度的提高,两种人工缺陷引入后材料的拉伸应变分别是 12.5%和 11.2%。Zhitao Chen 等^[57, 58]研究了可再分散乳胶粉和橡胶粉颗粒这两种人工缺陷对 SHCC 的力学性能的影响。结果表明改性后的材料的拉升应变能力得到了大幅度的提高,聚合物可以使材料的拉伸应变提高 1-3 倍橡胶粉也可以使材料的拉伸应变提高 56%-97%。但是这两种人工缺陷会导致材料抗压强度的大幅度下降,聚合物会使材料的抗压强度下降 10%-32%,胶粉更是会让材料的抗压强度下降 20%-42%。为更好的研究基体缺陷对 SHCC 性能的影响,深入研究其开裂影响机理, Cong Lu 等^[59]通过使用 X 射线计算机断层扫描方法研究 ECC 中开裂强度与裂纹分布之间的相关性,并确定预先存在缺陷的尺寸是主要影响参数。同时还通过考虑裂纹桥接应力与裂缝张开距离的关系中的更多因素,并采用迭代裂纹剖面,对 ECC 复合材料的开裂裂纹强度理论进行了修正。新模型揭示了开裂强度如何依赖于裂纹尺寸,并与试验结果吻合良好。

综上,通过调节基体中的矿物掺合料比例,骨料种类,裂纹和缺陷的尺寸与分布,能够让 SHCC 产生多缝开裂应变硬化行为,提高其在宏观上的力学表现。然而现有基体改性手段对 SHCC 微观性能的研究尚不充分,因此需进一步确定

基体中缺陷尺寸，数量和分布对 SHCC 宏观性能的作用规律，解决缺陷的宏观设计难题。

1.4 应变硬化复合材料受弯构件研究现状

在现代土木工程领域，功能梯度结构（Functionally Graded Structure, FGS）作为一种新型结构材料，因其能够实现材料属性沿梁长度或厚度方向的梯度变化而受到广泛关注。这种梯度变化使得结构能够根据受力需求在不同区域展现出不同的力学性能，从而优化结构设计，提高材料利用率和结构性能。本项目明确功能梯度结构的核心量化指标：包括性能梯度变化率、功能区厚度占比、界面粘结强度、梯度层力学性能匹配度等，为工程设计提供定量依据。高延性水泥基复合材料作为一种具有优异力学性能和裂缝控制能力的新型水泥基材料，将其用于受弯构件、受拉构件、路面薄层、隧道衬砌补强等多类结构部位，能够实现材料利用率与构件性能的双向优化，其在功能梯度结构中的应用研究逐渐成为学术界的热点，突破原仅有针对受弯构件的研究局限，拓展至公路工程多类核心结构。

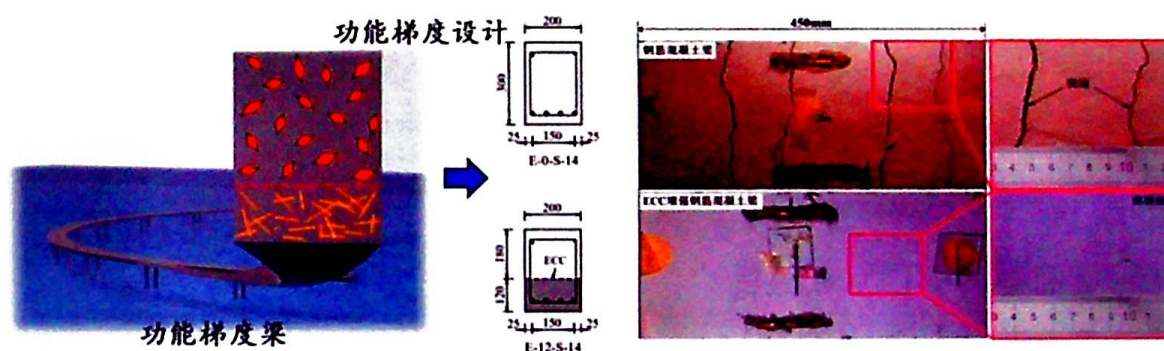


图6 功能梯度梁应用场景与裂缝控制能力

Maalej 和 Li 等^[60]提出了用于钢筋混凝土抗弯构件的新设计以提高其耐久性。该设计利用了高延性水泥基复合材料的独特性能来限制裂缝宽度。高延性水泥基复合材料可代替常规钢筋混凝土构件中围绕主钢筋的混凝土材料。通过这种设计，可以使裂缝宽度限制为传统钢筋混凝土从未达到的值，有利于防止侵蚀性物质迁移到混凝土或钢筋中，可以减少由于纵向裂纹或剥落引起的加速腐蚀，防止当今许多钢筋混凝土结构常见的剥落和分层问题。Zhang 等^[61]从理论和实验两方面研究了受弯荷载作用下的高延性水泥基复合材料增强钢筋混凝土梁。四点弯曲试验结果表明，高延性水泥基复合材料层的应用使得钢筋混凝土梁的弯曲强度和延性增加，并且改善程度随高延性水泥基复合材料厚度的增加而增加。模型的仿真结果表明，高延性水泥基复合材料抗弯强度和延性会在厚度大于某个特定值的情况下显著增加。因此，临界高延性水泥基复合材料厚度是一个重要的设计参

数。张秀芳等^[62-64]完成了高延性水泥基复合材料增强钢筋混凝土梁的弯曲受力试验,结果表明,高延性水泥基复合材料能提高梁的抗弯承载力,也能控制裂缝宽度;试验还验证了平截面假定在高延性水泥基复合材料增强钢筋混凝土梁里的适用性以及钢筋与 ECC 的变形协调性;给出了 ECC 增强钢筋混凝土梁的正截面承载力公式和便于工程人员使用的界限配筋率与正截面刚度计算公式。乔治等^[65]以 U 型 ECC 作为永久性模板浇筑混凝土制作外包 U 型 ECC 增强钢筋混凝土梁,通过 3 种不同的界面处理方式对 ECC 和混凝土接触的界面进行了处理,发现 ECC 提高了梁的承载能力和延性,发现外包 U 型 ECC 增强钢筋混凝土梁承载力受界面处理的影响不大但延性系数受界面处理的影响较大,给出了计算外包 U 型 ECC 增强钢筋混凝土梁挠度的简化方法。

综上,目前学者多关注于功能梯度梁承载力计算与功能梯度区的范围设计,忽略不同材料协同提升作用与使用需求之间的关系,对于应变硬化复合材料功能梯度梁的系统试验研究和理论分析仍相对不足。因此开展高延性复合材料功能梯度梁受力性能与服役阶段裂缝发展机制研究,并将其应用于桥梁、隧道等工程加固与新型结构体系设计中,对于提升土木工程结构的服役性能与使用寿命具有重要的科学意义和应用价值。

2. 项目前期科研及现有工作条件

2.1 项目的支撑条件

在国家自然科学基金、陕西省重点研发计划、陕西省科技统筹创新计划等项目的支持下,申请人系统开展了高性能材料与结构体系相关研究工作,形成了高性能工程结构体系与全寿命设计理论等系列成果,应用于全国多地首创性、地标性重大公共建筑和大型生命线工程。项目组拥有基础扎实、配合默契的科研团队,研究方向涉及土木工程、力学、材料科学与工程、环境科学与工程、道路工程等学科方向。团队负责人刘喜、核心成员吴涛、汪明磊、李明轩均长期从事土木工程相关教学和研究工作。刘喜教授主要从事高性能绿色复合材料研发与应用体系研究,吴涛教授主要从事建筑结构全寿命设计理论研究,汪明磊主要从事高性能复合材料多尺度数值计算模型研究、李明轩主要从事高性能水泥基胶凝材料研发工作。核心成员赵佳、王磊、王力、雷晓峰、祁春辉、涂智能、白梅力、何康、付颖嘉长期从事于土木工程工程领域设计、建设与技术应用工作,各成员的紧密合作有效提高创新技术的先进性与应用水平,相关研究成果在《Composite Structures》《Construction and Building Materials》《建筑结构学报》《工程力学》等国内外高水平学术期刊发表论文 26 篇,授权国家发明专利 6 项,出版学术专著 1 部。

申请人团队所在土木工程学科是学校“世界一流学科”重要组成部分,团队在陕西省“土木工程基础设施防灾国际联合研究中心”等平台支持下,拥有完善的试验设备及数值计算条件,协作单位陕西西公院工程试验检测有限公司(原西安公路研究院公路工程试验检测中心)共有试验检测设备 769 台(套),部分设备和试验设施达到国际先进水平,满足综合甲级、交通工程资质涵盖项目试验检测的仪器设备要求。本课题组成员长期从事混凝土结构基本理论及试验方面的研究积累,完成多项陕西省内公路交通领域大型工程项目,已取得了显著的研究工作成绩,能够满足本研究开展的各项需求。

2.2 工作基础

(1) 纤维增韧高延性地聚物复合材料力学性能试验研究

① 钢纤维增韧地聚物复合材料研发

完成了 13 组配合比的地聚物轻骨料混凝土力学性能测试研究, 明确了胶凝材料、碱胶比、水胶比、碱激发剂模数、钢纤维掺量及粗骨料掺量对地聚物轻骨料混凝土性能的影响规律。完成了地聚物轻骨料混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究, 测得地聚物轻骨料混凝土的单轴受压应力-应变全曲线, 描述其破坏过程, 重点分析了不同影响因素对曲线特征点的影响。

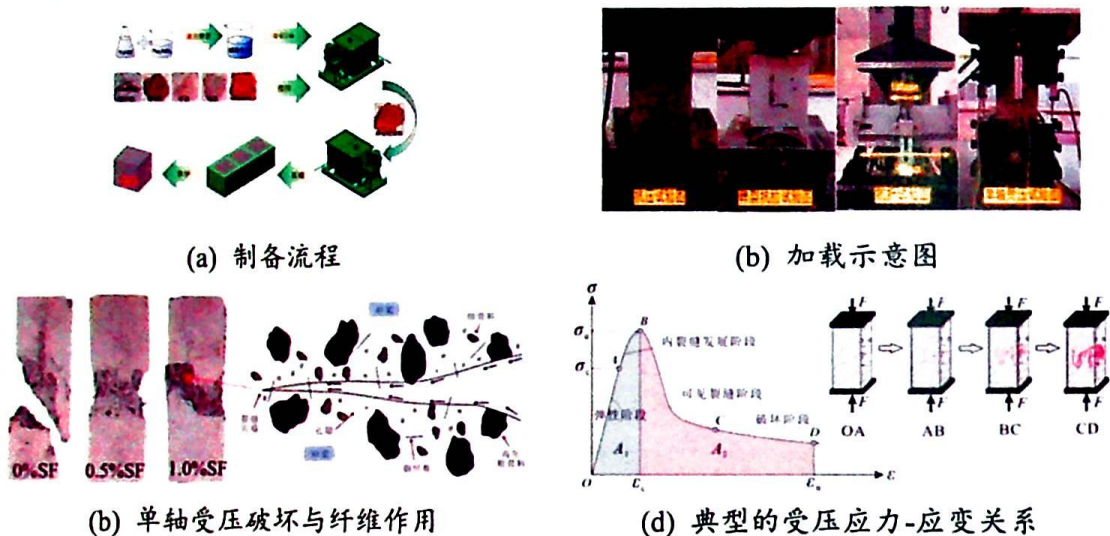
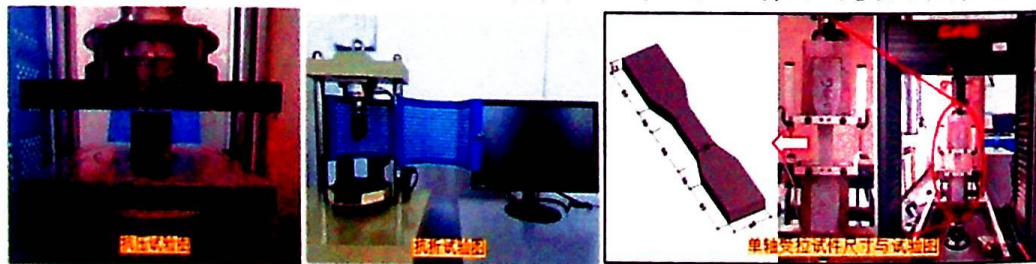


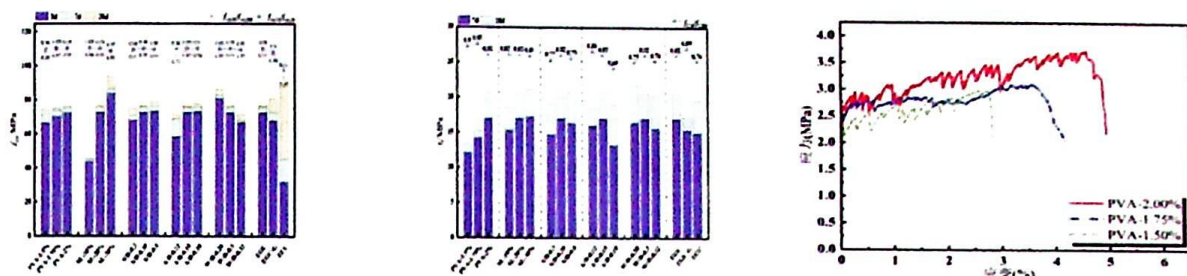
图 7 钢纤维增韧地聚物复合材料研究

② PVA 纤维增韧高延性地聚物复合材料研发

高延性地聚物复合材料力学性能。采用粉煤灰和矿渣作为胶凝材料, 掺加石英砂和 PVA 纤维等材料进行 EGC 的制备, 开展了 13 组不同配合比的力学性能试验, 系统地分析了纤维掺量、矿渣掺量、砂胶比、碱胶比、水胶比这五个主要影响因素对 EGC 力学性能的影响规律, 通过单轴拉伸试验对 EGC 的破坏模式、单轴拉伸强度和变形等指标进行了研究, 根据试验结果分析不同变量对 EGC 单轴拉伸性能的影响, 建立了单轴受拉本构模型, 并与水泥基 ECC 和国产纤维 EGC 进行了对比试验, 研发出了满足工程结构需求的高延性地聚物复合材料。



(a) 力学性能试验

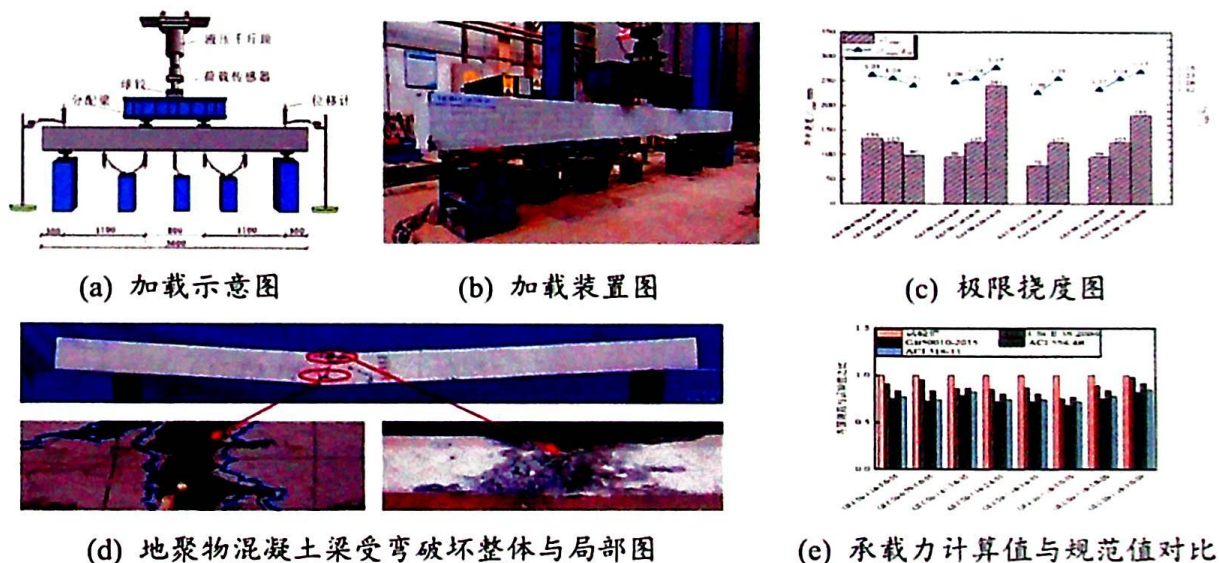


(b) 抗压强度 (c) 抗折强度 (d) 应力应变关系

图8 PVA纤维增韧高延性地聚物复合材料研究

(2) 混凝土受弯构件受力性能试验研究

① 钢纤维地聚物混凝土梁受弯性能研究。完成了8根地聚物轻骨料混凝土梁的受弯性能试验，观察其破坏过程及破坏形态，研究配筋率、净跨长度、混凝土强度以及骨料掺量对构件弯矩-跨中挠度曲线、受弯承载力、裂缝宽度、刚度及延性等的影响，重点分析了各因素的耦合作用，分析各国规范对地聚物轻骨料混凝土梁的适用性，建立合理的地聚物轻骨料混凝土梁受弯承载力计算模型、跨中挠度计算模型以及裂缝宽度计算模型，为地聚物轻骨料混凝土梁在实际工程中的推广提供参考。



(d) 地聚物混凝土梁受弯破坏整体与局部图 (e) 承载力计算值与规范值对比

图9 钢纤维地聚物混凝土梁受弯性能研究

② FRP筋轻骨料混凝土梁受弯性能研究。完成了9根配GFRP筋、1根配钢筋、6根配CFRP的轻骨料混凝土梁的受弯性能试验，观察了试件的破坏过程与破坏形态，分析了纤维掺量、纵筋类型、配筋率及纵筋直径等参数对试件承载能力、荷载-跨中挠度曲线、裂缝宽度等受弯性能的影响，采用美国规范（ACI 440.1R-15）、中国规范（GB 50608—2010）和加拿大规范（CSA S806-12、ISIS-M03-07）通过挠度、裂缝宽度和承载能力等参数评估了该类构件的适用性。

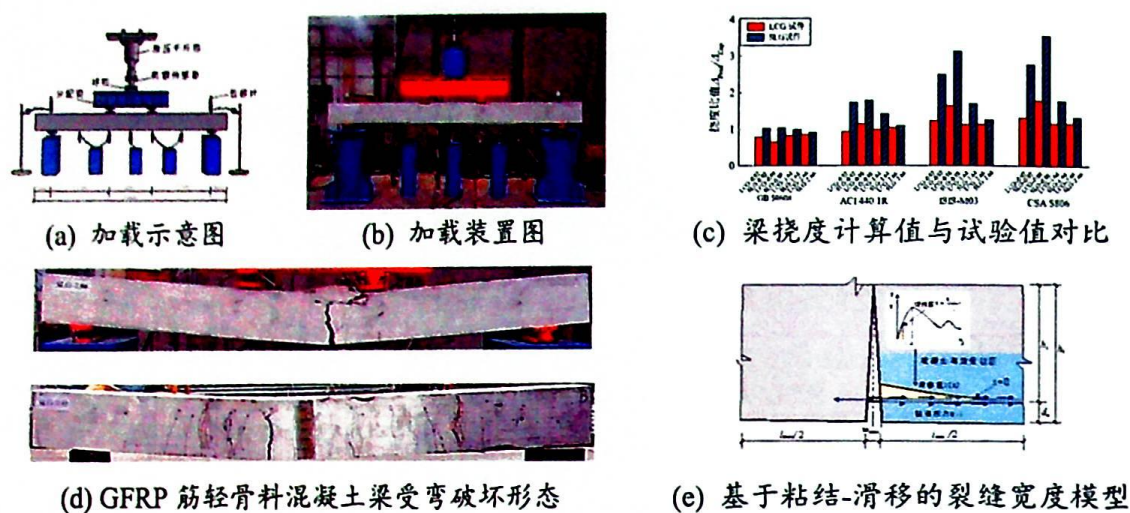


图 10 FRP 筋轻骨料混凝土梁受弯性能研究

③ 预应力 FRP 筋轻骨料混凝土梁受弯性能研究。监测了预应力 FRP 筋纤维增韧轻骨料混凝土构件长期预应力损失演变过程，基于 Monte Carlo 随机有限元法建立了预应力损失量化表达，完成了 9 根无粘结预应力 CFRP 筋轻骨料混凝土梁受弯性能试验，明确了有、无粘结预应力 FRP 筋组合方式等特征参数对构件受弯性能的影响规律，从承载能力与服役性能角度，定量描述无粘结预应力 FRP 筋应变增量变化规律，建立了 FRP 筋纤维增韧轻骨料混凝土受弯构件服役阶段挠度与裂缝宽度分析模型，提出了基于服役性能的计算理论。

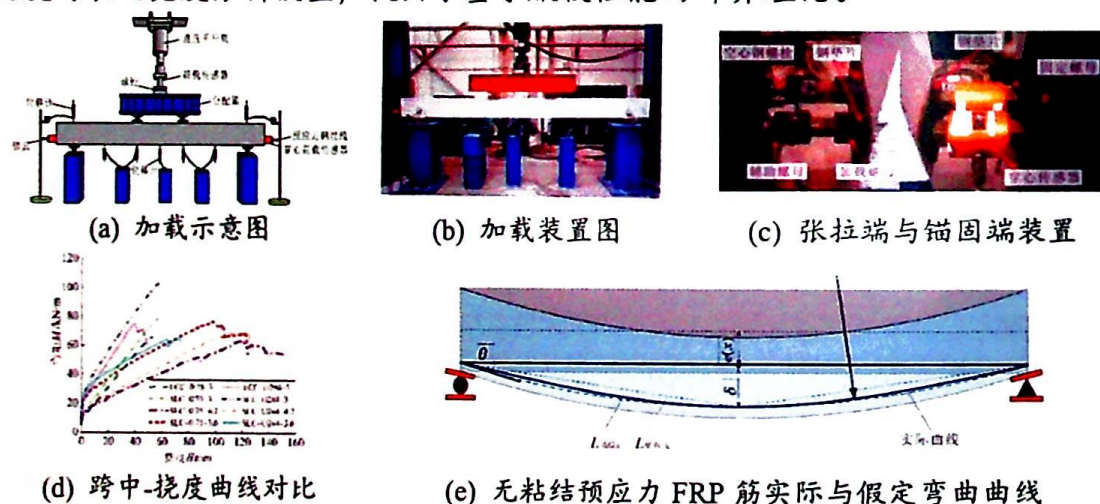


图 11 预应力 FRP 筋纤维增韧轻骨料混凝土梁受弯性能研究

(3) 纤维复合材料数值计算与受弯构件精细化模拟研究

① 基于微观力学模型的纤维复合材料多缝开裂数值计算。基于蒙特卡罗方法建立纤维随机分布模型，验证截面纤维埋置深度与角度的分布函数，进一步基于单根纤维粘结滑移模型建立多纤维耦合作用下截面桥连力计算模型。引入缺陷单元分布，基于裂缝桥连数值计算模型分析不同截面开裂后状态，采用断裂力学开裂强度计算模型得出不同截面开裂强度，进一步建立开裂后截面纤维应力传递数值计算方法，实现了单缝开裂到多缝开裂的跨尺度计算。

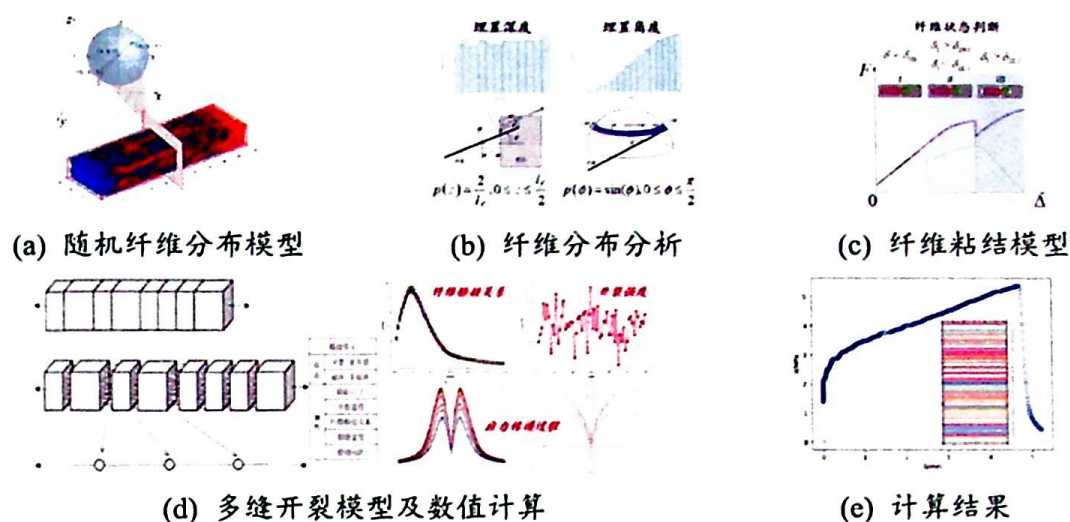


图 12 基于微观力学模型的纤维复合材料多缝开裂数值计算

② 基于宏观均匀化单元的细观模拟。基于均匀化理论的等效骨料场模型：开展了轻骨料混凝土梁多尺度模拟研究，基于随机分布与均匀化理论开发了 Python 建模脚本，分析了随机骨料场参数的取值范围，提出了随机分布场模型中轻骨料的基本力学参数，实现了对裂缝分布、破坏模式以及荷载-挠度曲线的准确预测。

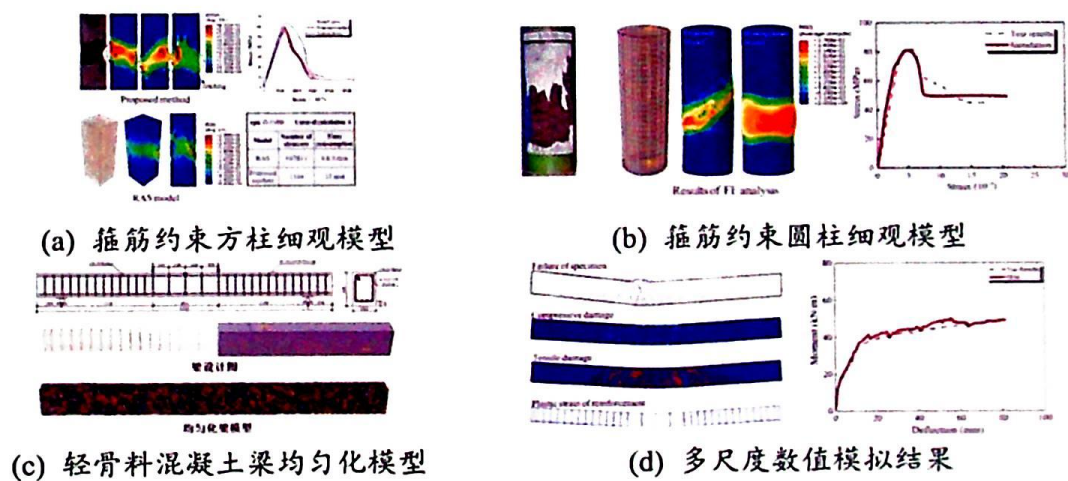


图 13 基于宏观均匀化单元的细观模拟

2.3 试验手段

本课题组所在的学科具有博士学位授予权,专业具有 70 多年的办学历史,作为申报单位的三个特色方向之一,近期加强了包括购置实验仪器与设备、实验室改装等在内的科研基地建设 with 实验室建设,大大改善了科研工作的硬件条件。项目依托的长安大学“建筑结构与抗震实验室”是“211”工程、“双一流”重点建设实验室,由国家级和省级土木工程实验教学示范中心组成。“材料分析测试中心”是现代分析测试技术以及仪器功能开发的教学、研究中心,为项目开展提供了充足的工作条件。项目所依托的实验室,拥有完善的试验仪器与设备,可以满足本研究对实验的要求。

(1) XRD (X 射线衍射仪): 主要用于晶体材料的物相测试,可精确分析材料的结构、晶粒度、应力等信息。该设备是研究高延性地聚物复合材料微观物相组成的关键设备;(2) SEM (扫描电子显微镜): 可以观察和检测非均相有机材料、无机材料微米、纳米级样品的表面特征,是研究材料表面形貌、组织结构与性能关系的最有效仪器。该设备是研究高延性地聚物复合材料纤维-基体界面区过渡区微观形貌特征的主要设备;(3) 工业 CT: 为申请项目研究高延性地聚物复合材料微观孔隙结构、内部缺陷的重要设备;(4) 万能试验机: 长春科新 WAW31000 型微机控制电液伺服万能试验机是研究混凝土力学性能试验的必要设备;(5) 电液伺服加载装置: 1000t MTS 电液伺服装置可为加固受弯构件进行加载,并拥有完备的数据采集系统;(6) 高性能计算机平台与大数据应用中心: 计算机平台可对试验数据进行分析、处理、仿真模拟计算以及理论模型的建构分析。另外,拥有 ABAQUS、ANSYS 等大型商用软件,完全满足本研究对模拟工作的各项要求。

综上所述:项目实施需要的试验设备与手段,借助试验室设备和采集系统均可完成。申请项目具有良好的工作条件支撑,现有的实验条件和计算分析条件均能够满足项目研究需求,达到预期目标。

3. 参考文献

- [1] Nematollahi B., Qiu J., Yang E. H., et al. Micro investigation of fiber-matrix interface properties of strain-hardening geopolymer composite[J]. *Ceramics International*, 2017(43): 15616-15625.
- [2] Yang E., Sahmaran M., Yang Y., et al. Rheological control in the production of engineered cementitious composites[J]. *ACI Materials*, 2007, 106(4): 357-366.
- [3] Choi S. J., J. I., Song J. K., et al. Rheological and mechanical properties of fiber-reinforced alkali-activated composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 96: 112-118
- [4] Nguyễn H. H., Nguyễn P. H., Lương Q. H., et al. Mechanical and autogenous healing properties of high-strength and ultra-ductility engineered geopolymer composites reinforced by PE-PVA hybrid fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2023, 142: 105155.
- [5] Trindade A. C. C., Curosu I., Liebscher M., et al. On the mechanical performance of K- and Na-based strain-hardening geopolymer composites (SHGC) reinforced with PVA fibers[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 248: 118558.
- [6] Trindade A.C.C., Liebscher M., Curosu I., et al. Influence of elevated temperatures on the residual and quasi in-situ flexural strength of strain-hardening geopolymer composites (SHGC) reinforced with PVA and PE fibers[J]. *Construction and Building Materials*. 2022, 314: 125649.
- [7] 杨清荔. 碱激发矿渣制备绿色 ECC 的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [8] Ling Y., Wang K., Li W., et al. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 747-757.
- [9] Öz H. Ö., Güneş M., Yücel H. E. Rheological and microstructural properties of FA+ GGBFS-based engineered geopolymer composites (EGCs) capable of comparing with M45-ECC as mechanical performance[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 65: 105792.
- [10] Ranjbar N., Zhang M. Fiber-reinforced geopolymer composites: A review[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 107: 103498.
- [11] Khayat K. H., Meng W., Vallurupalli K., et al. Rheological properties of ultra-high-performance concrete—An overview[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124: 105828.
- [12] Farooq M., Krishna A., Banthia N. Highly ductile fiber reinforced geopolymers under tensile impact[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 126: 104374.
- [13] Zahid M., Shafiq N., Razak S. N. A., et al. Investigating the effects of NaOH molarity and the geometry of PVA fibers on the post-cracking and the fracture behavior of engineered geopolymer composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 265: 120295.
- [14] Farooq M., Bhutta A., Banthia N. Tensile performance of eco-friendly ductile geopolymer composites (EDGC) incorporating different micro-fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 103: 183-192.

- [15] Yamanoi M., Maia J., Kwak T. Analysis of rheological properties of fibre suspensions in a Newtonian fluid by direct fibre simulation. Part 2: Flexible fibre suspensions[J]. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 2010, 165(19-20): 1064-1071.
- [16] Lao J. C., Ma R. Y., Xu L. Y., et al. Fly ash-dominated High-Strength Engineered Strain-Hardening Geopolymer Composites (HS-EGC/SHGC): Influence of alkalinity and environmental assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 447: 141182.
- [17] Nematollahi B. Micromechanics-based investigation of a sustainable ambient temperature cured one-part strain hardening geopolymer composite[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 131: 552-563.
- [18] 申晨. 工程地质聚合物复合材料的力学性能及断裂性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2019.
- [19] Choi J. I., Park S. E., Nguyễn H. H., et al. Strain-hardening and high-ductile behavior of alkali-activated slag-based composites with added zirconia silica fume[J]. *Materials*, 2019, 12(21): 3523.
- [20] Kan L., Zhang L., Zhao Y., et al. Properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced fly ash based Engineered Geopolymer Composites with zeolite replacement[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 231: 117161.
- [21] Yuan Z., Pang Z. M., Lu C., et al. Feasibility study of engineered geopolymer composites based high-calcium fly ash and micromechanics analysis[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02701.
- [22] Luo J. C., Ma R. Y., Xu L. Y., et al. Fly ash-dominated High-Strength Engineered/Strain-Hardening Geopolymer Composites (HS-EGC/SHGC): Influence of alkalinity and environmental assessment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 447: 141182.
- [23] Alrefaei Y., Dai J. G. Tensile behavior and microstructure of hybrid fiber ambient cured one-part engineered geopolymer composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 184: 419-431.
- [24] Nematollahi B., Sanjayan J., Qiu J., et al. High ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced one-part geopolymer composite: A micromechanics-based investigation [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2017, 17(3): 555-563.
- [25] Farooq M., Bhutta A., Banthia N. Tensile performance of eco-friendly ductile geopolymer composites (EDGC) incorporating different micro-fibers[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 103: 183-192.
- [26] Trindade A. C. C., Borges P.H.R., de Andrade S.F. Mechanical behavior of strain- hardening geopolymer composites reinforced with natural and PVA fibers[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 8: 753-759
- [27] Trindade A. C. C., Curosu I., Liebscher M., et al. Mechanical Evaluation of Na-Based Strain-Hardening Geopolymer Composites (SHGC) Reinforced with PVA, UHMWPE, and PBO Fibers[J]. 2021: 857-867.

- [28] Choi J., Nguyễn H. H., Park S., et al. Effects of fiber hybridization on mechanical properties and autogenous healing of alkali-activated slag-based composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 310: 125280.
- [29] Wang Y., Wang Y., Zhang M. Effect of sand content on engineering properties of fly ash-slag based strain hardening geopolymer composites[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 34: 101951.
- [30] Al-Majidi M. H., Lampropoulos A., Cundy A. B. Tensile properties of a novel fibre reinforced geopolymer composite with enhanced strain hardening characteristics[J], *Composite Structures*, 2017, 168: 402-427.
- [31] Al-Majidi M. H., Lampropoulos A., Cundy A.B. Strengthening of plain concrete beams using Strain Hardening Geopolymer Composites (SHGC) layers[C]. *IABSE Symposium, Vancouver 2017: Engineering the Future*, 2017, 109(19): 2707-2714.
- [32] Lin Z., Kanda T., Li V C. On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites[J]. *Concrete Science and Engineering*, 1999(1): 173-174.
- [33] Li V. C., Le K Y. Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [34] Yang E. H., Wang S., Yang Y., et al. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2008, 6(1): 181- 193.
- [35] Huang T., Zhang Y. X., Su C., et al. Effect of slip-hardening interface behavior on fiber rupture and crack bridging in fiber-reinforced cementitious composites[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2015, 141(10): 04015035.
- [36] Zhang Z., Qin F., Ma H., et al. Tailoring an impact resistant engineered cementitious composite (ECC) by incorporation of crumb rubber[J]. *Construction and Building Materials*, 2020(262): 120116.
- [37] Elnagar A. B., Afefy H. M., Baraghith A. T., et al. Experimental and numerical investigations on the impact resistance of SHCC-strengthened RC slabs subjected to drop weight loading[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(229): 116866.
- [38] WU H. C., LI V. C. Stochastic Process of Multiple Cracking in Discontinuous Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites[J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1995, 4(1): 83-102.
- [39] Bang Y. L., Kim J. K., Yun Y. K. Prediction of ECC tensile stress-strain curves based on modified fiber bridging relations considering fiber distribution characteristics[J]. *Computers & Concrete*, 2010, 7(5): 455-468.
- [40] LU C., Leung C. K. Y. A new model for the cracking process and tensile ductility of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 79: 353-365.
- [41] LU C., Leung C. K. Y., LI V. C. Numerical model on the stress field and multiple cracking

- behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 133: 118-127.
- [42] LI J. X., WENG J., YANG E. H. Stochastic model of tensile behavior of strain-hardening cementitious composites (SHCCs)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 124: 105856.
- [43] Yuan Z., Pang Z. M., Lu C., et al. Feasibility study of engineered geopolymer composites based
- [44] high-calcium fly ash and micromechanics analysis[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2024, 20: e02701.
- [45] Pakravan H. R., Latifi M., Jamshidi M. Hybrid short fiber reinforcement system in concrete: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2017(142): 280-294.
- [46] Swathi V., Asadi S S. An influence of pozzolanic materials with hybrid fibers on structural performance of concrete: A review[J]. *Materials Today: Proceedings* 2020, 43(2).
- [47] He S., Qiu J., Li J., et al. Strain hardening ultra-high performance concrete (SHUHPC) incorporating CNF-coated polyethylene fibers[J]. *Cement and Concrete Research*, 2017(98): 50-60.
- [48] Lu Z., Yao J., Leung C K Y. Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC[J]. *Cement and Concrete Research*, 2019(126): 105899.
- [49] Curosu I., Liebscher M., Mechtcherine V. Tailoring the crack-bridging behavior of strain-hardening cement-based composites (SHCC) by chemical surface modification of poly (vinyl alcohol) (PVA) fibers[J]. *Cement and Concrete Composite*, 2020(114): 103722.
- [50] Arain M F., Wang M., Zhang H. Study on PVA fiber surface modification for strain-hardening cementitious composites (PVA-SHCC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(197): 107-116.
- [51] T F K., F B., Ranade R., et al. The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC[J]. *Composites: Part B*, 2014(56): 536-545.
- [52] Wang S., Li V C. Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening[J]. *Fracture Mechanics of Concrete Structures*, 2004, 2(135): 10051012.
- [53] Lu C., Li V C., Leung C K Y. Flaw characterization and correlation with cracking strength in Engineered Cementitious Composites (ECC)[J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 107: 64-74.
- [54] Tosun-Feleko Lu K., Feleko Lu B., Ranade R., et al. The role of flaw size and fiber distribution on tensile ductility of PVA-ECC[J]. *Composites Part B Engineering*. 2014, 56: 536-545.
- [55] Wang S., Li V C. Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening[J]. *fracture mechanics of concrete structures*, 2004, 135(2): 1005-1012.
- [56] Zhang Z., Yuvaraj A., Di J., et al. Matrix design of light weight, high strength, high ductility ECC[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(210): 188-197.

- [57] Lu Z., Yao J., Leung C K Y., Using graphene oxide to strengthen the bond between PE fiber and matrix to improve the strain hardening behavior of SHCC[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 126: 105899
- [58] Chen Z., Yang E., Yang Y., et al. Latex-modified Engineered Cementitious Composites(L-ECC) [J]. Journal of advanced concrete technology, 2014, 12(12): 510-519.
- [59] Lu C., Li V C., Leung C. Flaw characterization and correlation with cracking strength in Engineered Cementitious Composites(ECC)[J]. Cement and concrete research, 2018(107): 64-74.
- [60] Mohamed Maalej, Victor C Li. Introduction of strain-hardening engineered cementitious composites in design of reinforced concrete flexural members for improved durability[J]. Structural Journal, 1995, 92(2): 167-176.
- [61] Jun Zhang, Christopher KY Leung, Yin Nee Cheung. Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam[J]. Composites science and technology, 2006, 66(11-12): 1501-151.
- [62] 张秀芳, 徐世烺. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(I): 基本理论[J]. 土木工程学报, 2008, (12): 48-54.
- [63] 张秀芳, 徐世烺, 侯利军. 采用超高韧性水泥基复合材料提高钢筋混凝土梁弯曲抗裂性能研究(II): 试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(10): 53-66.
- [64] 张秀芳, 徐世烺. 高韧性水泥基复合材料控裂钢筋混凝土复合梁正截面承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(03): 62-69.
- [65] 乔治, 潘钻峰, 梁坚凝, 等. ECC/RC 组合梁受弯性能试验研究与分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(04): 724-731.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

该研究围绕高延性地聚物复合材料 (SHGC) 的性能优化与工程应用, 核心聚焦以下关键科学问题, 旨在突破技术瓶颈、完善理论体系并支撑实际工程落地:

(1) 多因素调控下 SHGC 的微观机制与性能关联问题

前驱体 (粉煤灰、矿渣、硅灰)、碱激发剂 (模数) 等组分参数对 SHGC 断裂韧度、弹性模量等微观力学性能的影响规律尚不明确, 需揭示多元体系碱激发反应机制, 明确地聚产物物相组成、微观结构与宏观性能的内在关联。重点解决纤维与地聚物基体的界面改善技术难题, 通过物理、化学改性等多种手段, 优化纤维-基体界面粘结性能, 提升纤维利用率; 明确不同纤维类型 (单种/复合) 与基体的界面作用机制, 厘清基体组成对纤维粘结性能的调控机制, 解决界面粘结与纤维利用率优化的核心矛盾。

(2) SHGC 应变硬化的跨尺度计算与强韧化设计问题

缺乏“微观力学参数-单缝开裂性能-多缝开裂行为”的跨尺度关联模型, 难以通过微观参数精准预测材料宏观应变硬化特性, 需基于断裂力学理论揭示多缝开裂的物理数学逻辑。再生混凝土缺陷 (尺寸、分布、形状) 对 SHGC “微—细—宏”观性能的影响规律不明, 需建立考虑缺陷最优分布的强韧化设计方法, 解决缺陷调控与材料强度、延性协同优化的难题。

(3) SHGC 功能梯度加固构件的服役性能与设计方法问题

突破原有仅针对受弯构件的研究局限, 拓展至桥梁受拉区、隧道衬砌、公路路面等多类工程结构; 明确高延性地聚物功能梯度结构的破坏模式、刚度退化规律及界限特征参数, 不同影响因素 (功能区高度、SHGC 性能、配筋形式、施工工艺) 对构件力学性能的耦合作用机制需量化分析。缺乏统一承载力极限状态与正常使用极限状态的性能指标体系, 需建立挠度与裂缝宽度计算模型, 将设计方法升级为工程使用与施工指南, 提出基于服役性能的多场景加固设计方法, 解决功能梯度结构协同工作与长期服役稳定性问题。

(4) 固废资源化与材料性能、工程应用的协同适配问题

如何通过固体废弃物 (粉煤灰、矿渣、废旧混凝土等) 的定向优化处置, 在提升固废综合利用率的同时, 保证 SHGC 的超快硬化、超高延性等核心性能, 满足桥梁、隧道、路面等多场景的工程修复需求; 完善工程实践中的全性能试验体系, 验证材料在工程实际中的性能可靠性。

2. 主要研究内容及实施方案

2.1 主要研究内容

本项目拟将理论推导、试验研究、数值模拟相结合,开展高延性地聚物复合材料研发与应用研究,以达到提升基础设施服役性能与使用寿命、推动绿色可持续交通发展的目的,助力实现“碳达峰、碳中和”,拟开展研究与开发内容具体包括:

(1) 高延性地聚物复合材料 (SHGC) 裂缝发展机制与微观力学模型

开展高性能地聚物砂浆基体性能调控方法研究,分析前驱体(粉煤灰、矿渣、硅灰)、碱激发剂(模数)等主要因素对材料断裂韧度、弹性模量等微观力学参数影响规律,基于 SEM、XRD、MIP 等技术明确地聚产物的物相组成及微观结构,揭示微观结构与性能的内在联系,建立高性能地聚物砂浆基体微观力学性能调控方法;

开展 SHGC 开裂桥接应力模型研究,完成纤维(PVA、PE)与地聚物基体粘结性能试验与桥接应力试验,基于单根纤维拔出力-位移曲线确定界面微观力学参数,明确纤维-基体界面微观结构与物相组成对裂缝桥联行为的影响规律,揭示基体组成对纤维粘结性能的影响机制,建立基于微观力学的 SHGC 内部桥接应力计算模型。

(2) 高延性地聚物复合材料的跨尺度计算模型与强韧化设计方法

开展 SHGC 应变硬化性能跨尺度计算模型研究,完成试件宏观力学性能试验,分析单轴作用下裂缝开展数量与宽度,明确不同微观力学参数下试件初裂强度、极限拉伸应变和极限拉伸强度,基于断裂力学理论揭示多缝开裂的物理数学逻辑,综合建立“微观力学参数-单缝开裂性能-多缝开裂行为”的 SHGC 跨尺度计算模型;

完成“引入再生混凝土缺陷”作用下 SHGC “微—细—宏”观性能研究,联合 CT 技术与图像处理方法获取基体初始缺陷尺寸、分布、形状等参数,基于 SHGC 跨尺度计算模型完成不同缺陷分布的材料参数化分析,明确缺陷尺寸要素与宏观性能的细观尺度联系规律,建立考虑缺陷最优分布的 SHGC 强韧化设计方法。

(3) 基于服役性能的 SHGC 功能梯度加固受弯构件设计方法

开展高延性地聚物功能梯度加固梁受弯性能试验研究,观察不同影响因素下

试件的破坏模式和破坏过程,建立考虑统计分布的随机宏观分析单元,明确该类构件刚度退化规律与破坏模式界限特征参数,给出不同破坏模式下的功能梯度地聚物受弯构件承载力计算模型;

基于应力平衡和变形协调条件建立挠度与裂缝宽度计算模型,定量描述各影响因素对该类构件服役性能的影响规律,建立正常使用极限状态下该类构件的强度利用程度量化分析体系,统一承载力极限状态与正常使用极限状态性能指标,提出基于服役性能的高延性地聚物受弯构件功能梯度加固设计方法。

(4) SHGC 工程应用技术与施工工艺研发

结合 G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段桥梁、隧道、路面等具体工程场景,研发 SHGC 材料的配套应用技术,包括材料现场拌制工艺、浇筑/铺设工艺、养护工艺、与原有结构的界面处理工艺等。编制施工技术指南,明确材料的适用范围、施工流程、质量控制标准、验收指标等,为工程实际应用提供标准化指导。在依托工程开展试点应用,通过现场监测验证 SHGC 材料与应用技术的有效性,优化施工工艺,形成可复制、可推广的工程应用方案。

2.2 实施方案

(1) 高延性地聚物复合材料微观力学参数测定

① 配合比变量设计与微观试验

分析前驱体类型和激发剂含量对其反应产物的影响规律。FTIR、XRD 试验：分析产物化学成分，定性给出产物类型；SEM、EDS 试验：明确不同参数下纤维-基体界面微观结构分布规律，结合，纳米压痕试验：利用统计纳米压痕技术，得到纤维-基体界面过度区硬度、弹性模量等参数，基于均匀化理论界定各相弹性模量和硬度值域，确定砂浆基体与界面过渡区的反应产物名义含量；CT 扫描试验：研究不同参数下缺陷形成、发展及扩展规律，确定材料内部缺陷分布规律。综上考虑基体、界面微观结构与化学组分及缺陷分布规律等特征，揭示多元体系碱激发反应机制，为后续高延性地聚物复合材料的纤维传力机制与裂缝开展行为研究提供理论支撑。

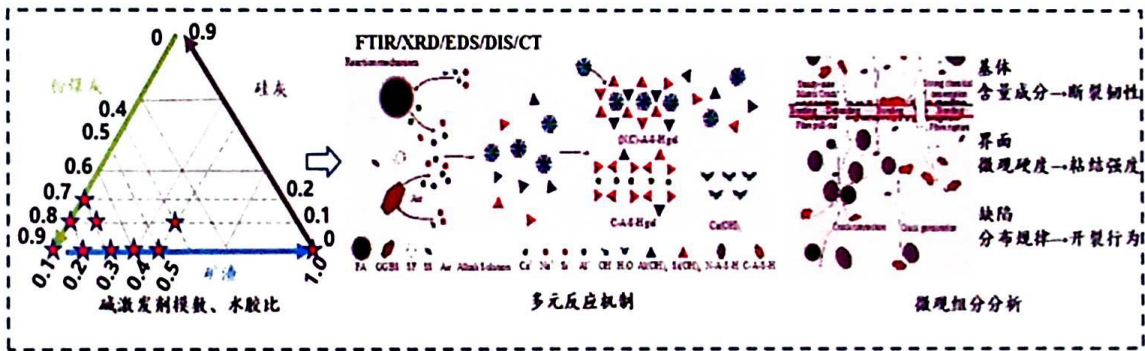


图 14 配合比变量设计与微观试验设计

② 基体断裂韧性三点弯曲试验

试件的弹性模量和断裂韧性是通过带切口的棱柱体的三点弯曲试验测得，实验装置如图所示。三点弯曲试验采用疲劳试验机进行位移加载，加载速度为 0.2~200mm/min。由试验机自动记录试验过程中的外力荷载。预制裂缝的开口位移由量程为 2mm 的夹式引伸计记录。试件尺寸和预制裂缝尺寸如图 15 所示，试验采用的是 40mm×40mm×160mm 的棱柱体试件。裂缝采用预埋刀片法预制，刀片厚度 1mm，预埋深度 16mm，刀片尖端为等腰三角形。

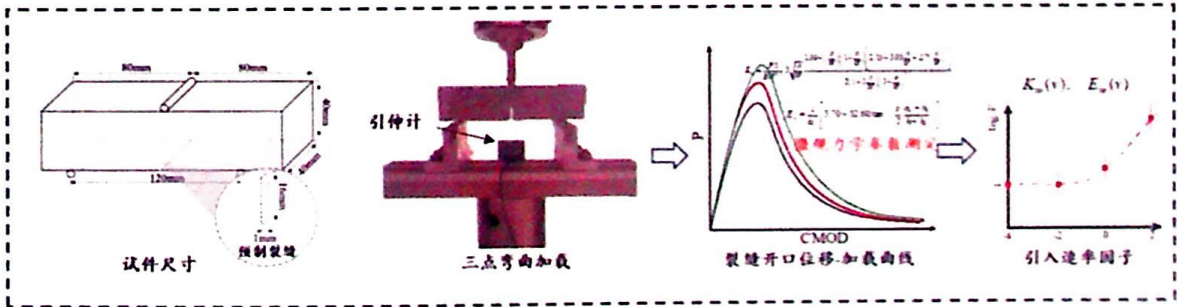


图 15 基体断裂韧性三点弯曲试验设计

③ 纤维-基体单丝拔出试验

首先用双面胶将长的 PVA 纤维等距粘在中间层上, 然后将新拌基体倒入模具中。使用精密切割机切割养护好的试件, 切割方式如图所示。使用疲劳试验机对切割好的试件进行加载, 试验过程中首先将试样粘在固定在 X-Y 工作台上的下夹具上, 纤维的自由端需要用高强胶水粘在固定在上夹具上的铝板上, 上夹具固定在一个量程为 10N, 精度为 0.0005N 的传感器上面。加载采用位移控制方式, 加载速度为 0.2~200mm/min。

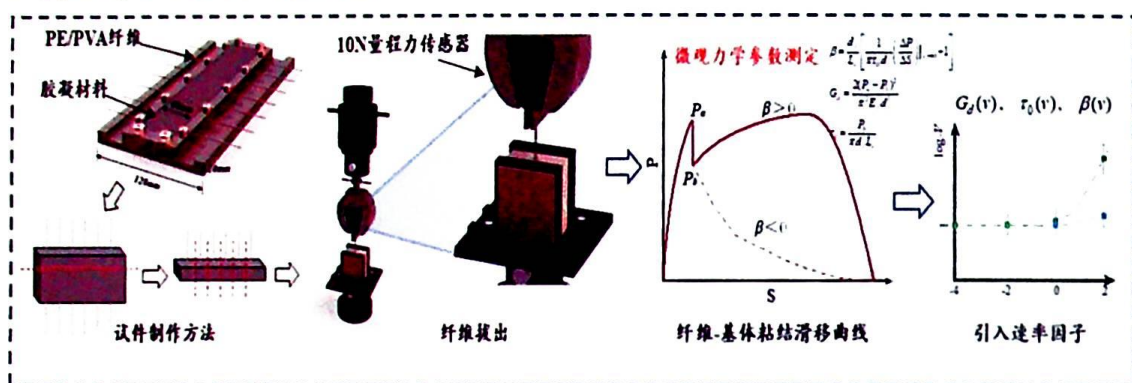


图 16 纤维-基体单丝拔出试验设计

④ 桥应力试验

使用精密切割机对狗骨试件中间位置进行预切口处理, 切割机刀片厚度为 0.9mm, 切口尺寸如图所示, 使试件产生局部加强应力场的变截面, 以保证裂缝在加载时沿单缝发展。使用疲劳试验机进行加载, 加载采用位移控制方式, 加载速度为 0.2~200mm/min。使用特制夹具将夹持式引伸计固定在试件变截面处, 通过引伸计记录加载过程中单裂缝宽度的变化。

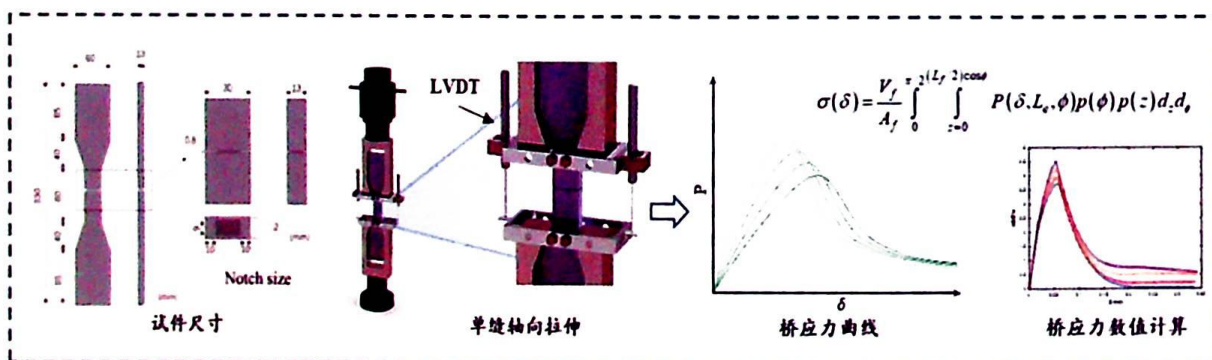


图 17 桥应力试验设计

(2) 高延性地聚物复合材料宏观力学性能试验设计

① 基本力学性能试验

选取纤维体积分数、矿渣/粉煤灰掺量、等因素为试验变量，测定轻骨料混凝土的立方体抗压强度、单轴抗压强度、抗拉强度和断裂性能。立方体抗压强度测试采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的立方体试块，单轴抗压强度测试采用 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$ 的棱柱体试块，单轴拉伸测试采用哑铃型试样，均采用万能试验机加载；断裂性能测试采用三点弯曲加载，顶部加载点位移 δ 使用位移计测量，裂缝开口宽度采用引伸计进行记录，由 MTS 电子控制试验机采集荷载，全程采用位移控制的加载制度，加载速率 0.05mm/min (图 18)。

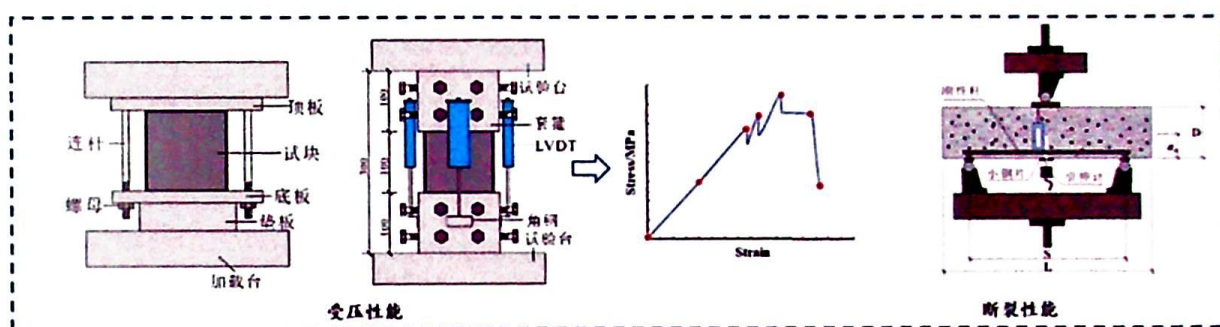


图 18 基本力学性能试验设计

② 轴向拉伸性能试验

高延性地聚物试件的单轴拉伸试验是采用 JSCE 推荐的哑铃型试件来进行，试件的几何形状和实验装置如图所示。试验的测试在疲劳试验机上进行，加载模式采用位移加载模式，加载速度为 $0.2 \sim 200\text{mm/min}$ 。试件受拉区的变形由固定在试件上的两个高精度 LVDT 位移传感器采集。试验过程中，由系统自动记录拉伸荷载。对于每组配比，测试 4 个试样。

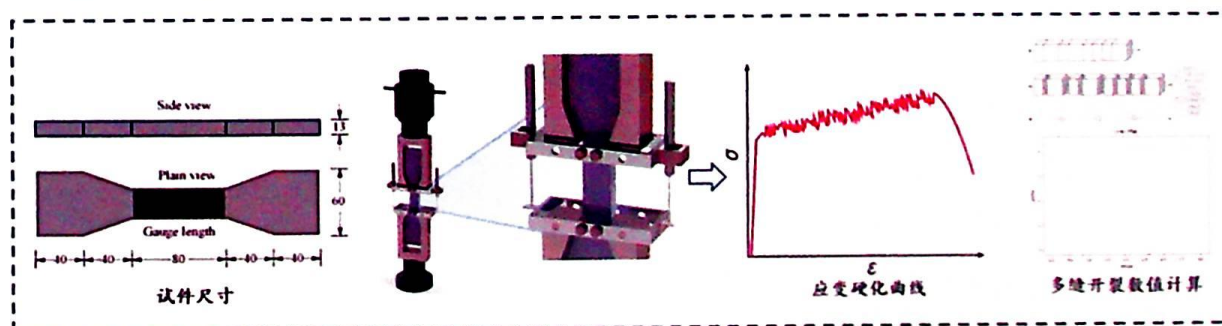


图 19 轴向拉伸性能试验设计

(3) 高延性地聚物多尺度性能调控设计

① 材料改性试验设计

基于前述跨尺度数值计算模型完成微观力学参数与基体开裂强度变量下材料宏观性能参数化分析,从纤维-基体界面与基体缺陷分布两个层面对其改性。单裂缝桥接能力提升:采用物理与化学联合修饰方法改性纤维表面,完成细观力学与宏观力学性能试验;多裂缝开裂行为优化:引入人工固废地聚物轻骨料作为人工缺陷,考虑不同缺陷尺寸与分布,完成材料拉伸性能试验。

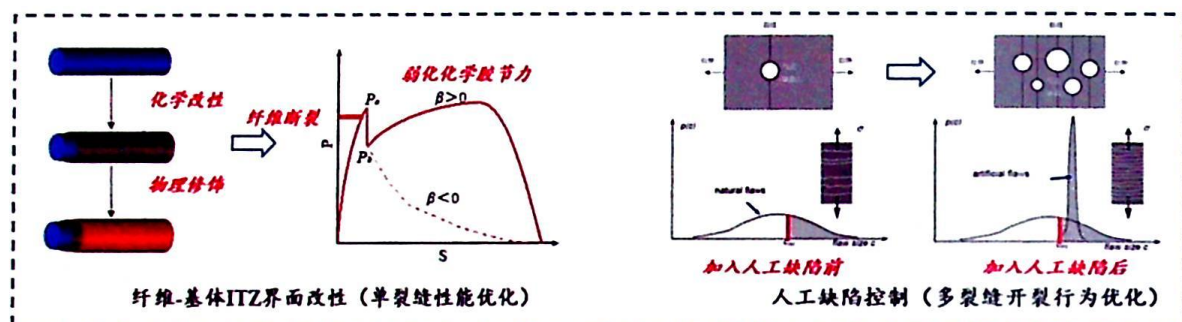


图 20 材料改性试验设计

② 高延性地聚物功能梯度梁受弯试验设计

针对功能区高度、功能区 SHGC 性能、配筋形式设计并完成 8 根混凝土功能梯度梁,进行受弯性能试验,系统分析各因素对试件破坏模式、承载能力、弯矩-跨中挠度曲线、裂缝宽度等受弯性能的影响,重点关注裂缝发展形态,采用两台照相机观察梁在整个加载过程中的裂缝发展趋势,相机垂直梁表面放置,距离为 2760mm,并使用两台 50W 的 LED 补光灯用于调整亮度。试验布置 5 个位移计分别监测梁中点、加载点和支座处的位移,梁顶中部混凝土和跨中钢筋布置应变片监测应变,试验全程采用采用 DH3820 及 DIC 系统进行数据采集,试件加载装置及 DIC 观测系统见图 21。

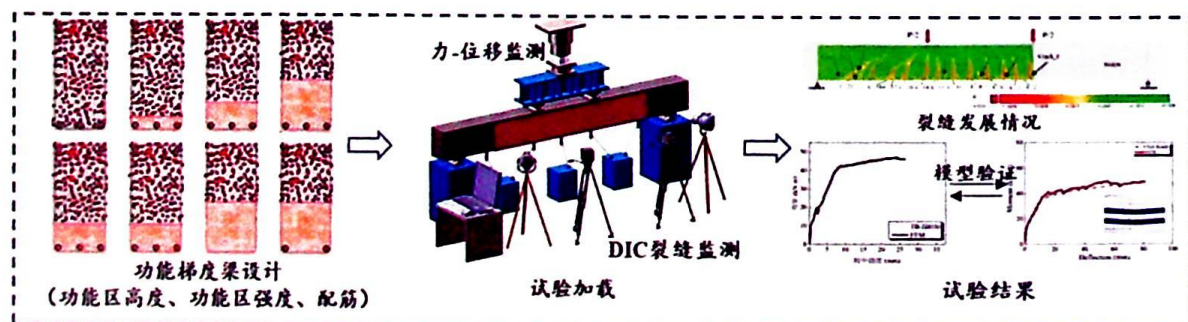


图 21 高延性地聚物功能梯度梁受弯试验设计

(4) 固废基 SHGC 工程应用试验

① 关键指标定量评价试验

开展 SHGC 材料的长期加载、冻融循环、盐雾老化等试验，测试不同服役阶段的延性保留率、动态模量衰减率，建立关键指标的演化模型与定量评价标准。

② 工程化全性能试验

补充原材料波动试验（不同产地、批次的粉煤灰/矿渣）、拌合物现场适配试验（不同施工温度、坍落度要求）、长期性能与特殊性能试验（抗渗、抗冻、抗硫酸盐侵蚀），全面验证材料的工程适用性。

③ 固废基 SHGC 分场景试验

分别设计纤维砼与粉煤灰/矿渣/旧砼固废基 SHGC 试件，针对重载结构、普通构件、路面修复等不同场景开展针对性性能试验，明确不同场景下的材料配合比与性能要求。

3. 技术路线

本研究以“固废资源化-材料性能优化-结构应用落地”为主线,采用“理论推导-试验验证-模型构建-工程适配”的递进式技术路径:首先,筛选粉煤灰、矿渣及依托工程废旧混凝土为原料,设计前驱体配比、碱激发剂模数、纤维类型及掺量等变量的配合比方案,通过XRD、SEM、MIP等微观测试与单丝拔出、三点弯曲试验,揭示碱激发反应机制与纤维-基体界面作用规律,建立SHGC基体性能调控方法;其次,开展SHGC单轴拉伸、多缝开裂观测试验,结合DIC技术获取宏观力学参数与裂缝发展数据,基于断裂力学与蒙特卡洛方法构建“微观力学参数-单缝开裂-多缝开裂”跨尺度计算模型,再通过CT扫描量化再生混凝土缺陷参数,经参数化分析建立考虑缺陷最优分布的强韧化设计方法;最后,以G65包茂高速桥梁隧道修复为背景,设计功能梯度加固梁并开展受弯性能试验,结合长期加载与环境模拟试验,建立承载力、挠度及裂缝宽度计算模型,形成基于服役性能的加固设计方法,同步在依托工程开展试点修复与现场监测,优化施工工艺并输出技术指南,全程通过平行试件、设备校准保障数据可靠性,最终完成论文、专利等成果整合。

本项目工作流程围绕“筹备-实施-应用-验收”四阶段有序推进:首先启动项目筹备,明确成员分工与沟通机制,同步开展依托工程现场调研以采集病害样本、收集固废原料并完成成分检测,清点校准试验设备、采购耗材,细化各子课题试验方案并经专家评审后备案;接着进入基础试验与理论构建阶段,先制作基体及纤维-基体界面试件,通过微观测试与界面、力学试验明确碱激发机制及界面作用规律,建立基体性能调控方法,再基于优化配合比开展SHGC宏观力学试验获取多缝开裂数据,随后结合试验数据构建“微观-细观-宏观”跨尺度计算模型并初步验证,同时通过含再生混凝土缺陷的SHGC试件试验与参数化分析,形成考虑缺陷最优分布的强韧化设计方法;之后推进结构试验与工程应用,依据依托工程参数缩尺设计制作功能梯度加固梁试件,开展受弯性能、长期加载及环境模拟试验,分析破坏模式与承载力规律,修正计算模型并形成基于服役性能的加固设计方法,同步在依托工程选取病害部位开展SHGC试点修复,布设设备并按计划监测;最后进入成果整合与验收阶段,系统梳理全过程试验及工程监测数据并形成数据汇编,完成学术论文、专利申报、技术指南编制及研究生成果整理,按要求编制验收材料,经预验收修改完善后提交正式验收申请,配合完成评审并推进成果转化对接。

4. 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目聚焦高延性地聚物复合材料（SHGC）的微观机制、跨尺度设计及工程应用研究，所形成的技术成果与理论体系具有明确的工程落地导向，可与交通基础设施建设、既有工程加固改造、固废资源化利用等领域的技术改造及基本建设计划深度衔接，具体衔接方向与应用推测如下：

（1）与既有交通工程加固改造计划的衔接

项目研究的 SHGC 功能梯度加固技术，可直接对接高速公路、铁路桥梁、隧道衬砌等既有工程的维修整治计划。依托 G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段专项维修工程形成的加固设计方法，可推广应用于陕西省内同类病害桥梁（如混凝土桥面断裂、隧道衬砌破损）的技术改造，通过 SHGC 功能梯度层的局部铺设或整体加固，替代传统混凝土修复工艺，解决既有工程裂缝控制难、耐久性不足的痛点。成果中建立的承载力计算模型、挠度与裂缝宽度预测方法，可纳入交通工程加固技术标准修订，为全省乃至全国既有交通基础设施的升级改造提供标准化技术支撑，降低长期运维成本。

（2）与新型交通工程建设计划的衔接

在新建桥梁、隧道等交通基础设施建设中，项目研发的 SHGC 材料及强韧化设计方法，可衔接绿色建造、低碳基建的发展需求，作为新型高性能结构材料纳入工程设计方案。例如，在新建公路桥梁的受拉区、隧道衬砌关键受力部位采用 SHGC 功能梯度结构，替代部分传统钢筋混凝土，实现结构自重优化与抗灾变能力提升，契合《绿色交通“十四五”发展规划》中资源节约集约利用的要求。同时，基于固废资源化的 SHGC 制备技术，可与新建工程的环保建设指标衔接，通过粉煤灰、矿渣等工业固废的高效利用，降低工程建材的碳排放。

（3）与固废资源化利用工程计划的衔接

项目形成的“固废定向优化-材料性能调控”技术体系，可衔接地方政府的工业固废、建筑垃圾分类处置及资源化利用基本建设计划。针对陕西省年产生量巨大的粉煤灰、矿渣及废旧混凝土，成果可指导建设固废基 SHGC 生产线，将固体废弃物转化为高性能工程材料，实现“变废为宝”。该生产线可作为区域固废资源化利用示范项目，对接交通、建筑等行业材料采购需求，形成“固废处置-材料生产-工程应用”的产业链闭环，既提升固废综合利用率，又为工程建设提供低成本、绿色化的新型建材，具备广阔的市场推广前景。

5. 有关技术经济指标

公路交通作为国民经济的基础性、先导性、战略性产业和服务性行业，“十四五”期间我省高速公路新建、改扩建规模超过 1800 公里，国省道建设规模约 3000 公里，农村公路建设规模超过 6 万公里。根据陕西交通运输统计年鉴，截至 2021 年，全省公路里程总计 183.4 万公里，其中公路桥梁总计 38065 座，公路隧道总计 1812 道，随着建设年限的增加，大规模的容量同时伴随着养护造价的增加。同时受资源禀赋、能源结构、发展阶段等因素影响，2021 年我省固废产量 5546 万吨，大部分固体废弃物难以投入生产，严重污染环境，不利于绿色可持续发展。

本项目考虑综合利用固体废弃物研制绿色高性能修复材料，研究成果主要包括高性能碱激发砂浆与高延性地聚物复合材料。项目中地聚物复合材料以粉煤灰、矿渣等固体废弃物进行制备，同时考虑消纳修复过程中产生的固体废弃物，研发全固废高延性地聚物复合材料，复合材料力学性能、工作性能及耐久性能满足相应要求，同时具备超快硬化与超高延性等特性，满足道路、桥梁及隧道工程的修复需求。材料性能满足规范要求，可大规模应用于工程建设中。

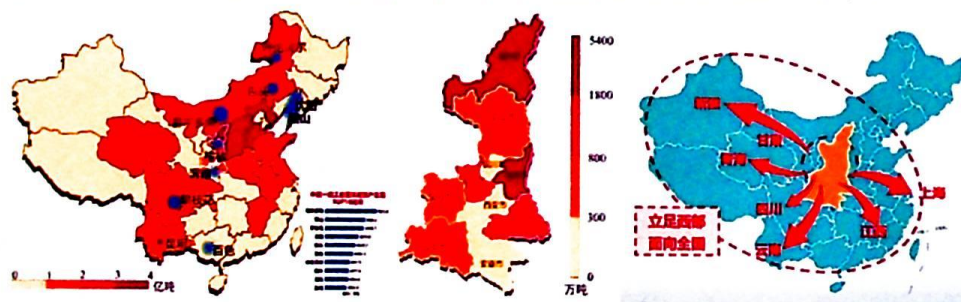


图 22 大宗固废产生量及产品推广布局图

高延性地聚物复合材料可用于混凝土桥梁、桥面板、隧道衬砌建设，大幅度提升构件服役期间性能与使用寿命，在满足性能水准下达到绿色固碳目标，实现全寿命降本增效。采用工业固废（粉煤灰、矿渣等）为主材，突破传统硅酸盐体系，并实现建筑垃圾超 40%资源化利用率；使材料碳排放降低 60%并提升抗裂性能 3 倍以上；解决界面薄弱层难题，使高性能加固材料抗压强度超 100MPa、抗拉强度超 10MPa、拉伸延性超 10%，有效减少高碳排放材料使用。在实际工程中应用高延性地聚物复合材料，预计提高养护项目固废综合利用率 90%，减少水泥用量 100%，提高新建项目固废综合利用率 40%，减少水泥用量 30%，能够有效促进煤炭、钢铁、建材等行业高质量发展，资源环境和经济效益显著，对缓解原材料紧缺、改善生态环境质量发挥重要作用，具有良好的应用前景。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

申请人团队所在土木工程学科是学校“世界一流学科”重要组成部分，团队在陕西省“土木工程基础设施防灾国际联合研究中心”等平台支持下，拥有完善的试验设备及数值计算条件，协作单位陕西西公院工程试验检测有限公司、陕西交控运营管理有限公司、中建六局第一建设有限公司共有试验检测设备 769 台（套），部分设备和试验设施达到国际先进水平，满足综合甲级、交通工程资质涵盖项目试验检测的仪器设备要求。本课题组成员长期从事混凝土结构基本理论及试验方面的研究积累，完成多项陕西省内公路交通领域大型工程项目，已取得了显著的研究工作成绩，能够满足本研究开展的各项需求。

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
刘喜	长安大学	男	1986-1 2-05	副高级	结构工程	项目负责人
吴涛	长安大学	男	1976-0 9-01	正高级	结构工程	项目总体指导
赵佳	陕西西公院工程试验检测有限公司	男	1987-0 3-24	副高级	桥梁工程	研究方案指导
王磊	陕西西公院工程试验检测有限公司	男	1982-0 9-08	副高级	道路工程 (路面)	组织科研课题实施
王力	陕西西公院工程试验检测有限公司	女	1984-0 8-03	副高级	交通工程 (机电工程)	科研试验工程应用
雷晓锋	陕西西公院工程试验检测有限公司	男	1974-1 0-30	正高级	隧道工程	理论模型推导
祁春辉	陕西交控运营管理有限公司	男	1993-0 1-18	工程师	道路工程	理论模型推导
涂智能	陕西西公院工程试验检测有限公司	女	1996-0 1-24	工程师	环境科学与工程	试验方案设计

姓 名	单 位	性别	年龄	技术 职称	专业	在项目中担任 具体工作
白梅力	陕西西公院工程试验检测有限公司	女	1983-09-16	副高级	土木工程	试验方案设计
何康	中建六局第一建设有限公司	男	1993-07-23	副高级	建筑与土木工程	科研试验工程应用
付颖嘉	陕西西公院工程试验检测有限公司	女	1990-02-24	助理工程师	道路工程	试验方案设计
汪明磊	长安大学	男	1998-10-23	技术员级	结构工程	理论模型推导
李明轩	长安大学	男	1998-03-28	技术员级	结构工程	试验方案设计

3. 各自承担的主要工作

本项目组建了一支由长安大学、陕西西公院工程试验检测有限公司等多家单位构成，涵盖桥梁工程、隧道工程、道路工程、结构工程等多专业领域的科研团队。团队职称层次分明，项目分工构建了“统筹管理—技术指导—理论研究—试验设计—工程应用”的完整闭环：刘喜担任项目负责人统筹全局，吴涛负责项目总体指导；赵佳牵头研究方案指导，王磊组织科研课题实施；雷晓锋、祁春辉、汪明磊负责理论模型推导；涂智能、白梅力、付颖嘉、李明轩负责试验方案设计；王力、何康负责科研试验成果的工程应用落地，全体成员各司其职、协同联动，为项目高质量推进提供坚实保障。

4. 项目主要负责人情况

刘喜，男，1986年12月生，陕西延安人，工学博士，副教授，博士生导师，陕西省青年科技新星，青海省“昆仑英才”计划拔尖人才，响应国家绿色可持续发展战略和“双碳”目标，围绕新型绿色建材、装配式结构体系、固废资源化等关键问题，主要从事混凝土结构体系研发与工程应用关键技术、新型绿色建材研发与性能提升等研究。先后参与省级“高性能结构与抗震创新团队”、“四主体一联合”校企研发平台等的建设工作。主持和参加国家自然科学基金、陕西省重点项目等纵横项课题20余项，出版学术专著1部，在《Engineering structures》《建筑结构学报》等高水平期刊发表学术论文30余篇，授权国家发明专利8项，担任《Construction and Building Materials》《建筑结构学报》等多本高水平期刊审稿人，相关成果获2023年陕西高等学校科学技术研究优秀成果一等奖（主持），2024中国产学研合作促进会科技创新成果奖（主持），2024年中铁建科学技术奖，2021年广西科学技术进步二等奖，2017年陕西省科学技术一等奖。

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

该工程项目应用单位经营范围广泛,能满足项目实施所需的研发条件和经费保障。本项目依托 G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段 (K910+600-K946+585) 专项维修整治工程, G65 包茂高速公路太乙宫至营盘段桥梁共计 55 座 (单幅), 累计长度 15443.69m, 隧道共计 26 处, 累计长度 43498.50m(上下行)。养护路段内共包含 6.9 公里的水泥混凝土桥面与 60 余处隧道衬砌板, 混凝土受弯区存在不同程度的断裂、破碎板、反复坑槽、露筋等病害, 需要根据病害发展程度对其采取局部修复或整跨、整联处治后重新浇筑, 彻底治理。同时混凝土破损处进行铣刨、凿除会产生较多的废旧材料, 采用合适的路面再生材料利用技术和工艺是本项目的重难点。

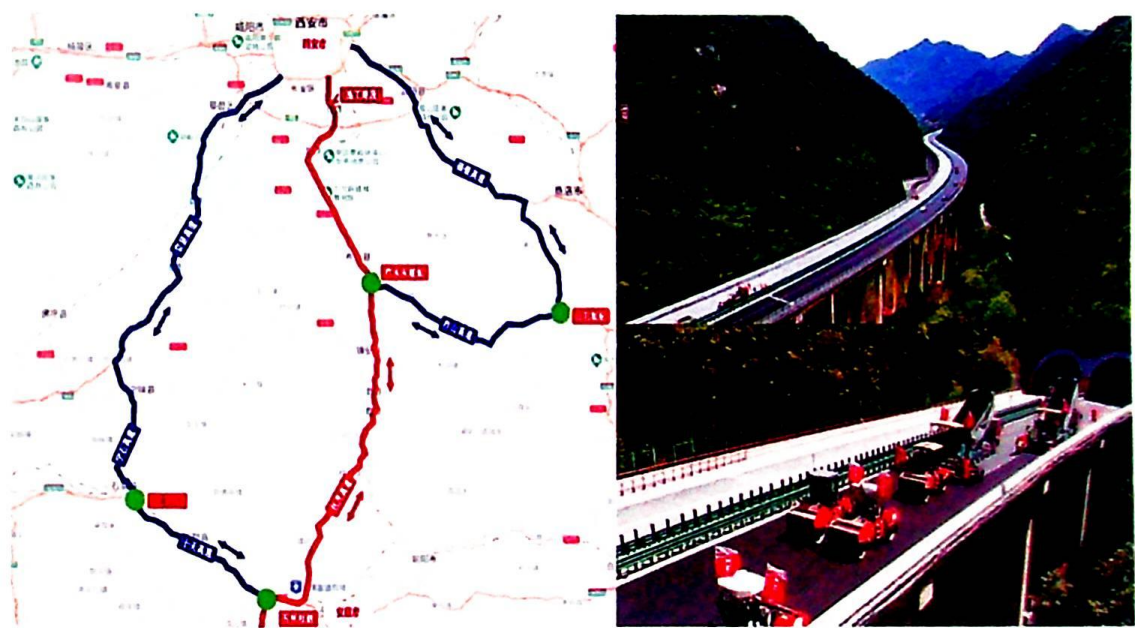


图 23 项目概况



(a) 桥梁底破损

(b) 隧道衬砌破损

图 24 箱梁底部混凝土开裂

2. 投资来源

依托项目

3. 工程进度与项目科研进度的配合

本项目严格遵循“科研服务工程、工程反哺科研”的协同原则，将科研进度与依托工程施工计划精准对接，分阶段实现科研与工程的深度融合，具体配合方案如下：

前期准备阶段（工程勘察设计期，第 1-3 个月）

工程进度：依托工程开展现场病害普查、破损部位检测及维修方案初步设计，完成废旧混凝土等固废材料的收集与堆放。

科研进度：同步开展依托工程病害样本采集与性能测试，分析混凝土破损机理及修复需求；基于工程现场固废材料（粉煤灰、矿渣、废旧混凝土）进行成分检测，优化 SHGC 材料配合比设计方案；结合工程维修范围，确定科研试验段（选取 1 座典型病害桥梁、1 处隧道衬砌破损区域）。

结合方式：科研团队全程参与工程勘察设计，将病害特征、固废资源状况纳入 SHGC 材料研发核心指标，确保材料性能适配工程修复需求；工程方提供现场检测数据与固废原料，为科研基础试验提供真实工程背景支撑。

科研试验阶段（工程施工准备期，第 4-9 个月）

工程进度：完成施工场地平整、施工设备进场，制定详细施工计划，明确修复区域的施工时序（优先施工科研试验段）。

科研进度：开展 SHGC 材料微观力学试验、宏观性能测试及跨尺度模型构建；完成功能梯度加固梁室内缩尺试验，优化加固设计参数；针对工程试验段需求，制备批量 SHGC 材料并进行现场适用性测试（工作性能、凝结时间等）。

结合方式：根据工程施工时序倒排科研试验节点，确保 SHGC 材料及加固技术在工程试验段施工前完成优化；工程方提供施工场地临时试验区域，协助科研团队开展现场材料性能验证，及时反馈施工可行性问题（如材料搅拌工艺、浇筑便利性等），指导科研方案调整。

工程应用阶段（工程主体施工期，第 10-15 个月）

工程进度：启动科研试验段施工，包括破损部位铣刨、凿除，SHGC 材料浇筑/铺设，功能梯度层施工及养护；同步开展非试验段常规维修施工。

科研进度：现场监测试验段 SHGC 材料施工过程中的工作性能，记录施工参数：布设应变片、位移计、裂缝监测仪等设备，实时监测构件受力性能及裂缝发展；采集施工过程中产生的废旧混凝土，开展再生缺陷调控试验，优化材料强

初化设计。

结合方式：科研团队驻场指导试验段施工，规范 SHGC 材料施工工艺（搅拌、浇筑、养护），解决现场技术难题；工程方严格按照科研方案实施试验段施工，协助采集施工及服役过程数据，确保试验数据的真实性与完整性；非试验段施工中遇到的特殊修复场景，及时反馈科研团队，作为技术拓展研究内容。

成果优化与验收阶段（工程竣工验收期，第 16-18 个月）

工程进度：完成全部维修施工，开展工程质量验收，对修复区域进行耐久性初期评估。

科研进度：整理现场监测数据，验证并修正 SHGC 材料跨尺度模型及加固设计方法；开展成果经济性与耐久性分析，形成完整科研报告。

结合方式：工程验收数据作为科研成果有效性的核心验证依据，科研团队根据工程验收反馈优化技术指南；将科研成果（SHGC 材料施工工艺、加固设计方法）纳入工程竣工技术总结，为后续同类工程提供参考；联合工程方开展成果推广演示，推动技术在依托工程后续养护及省内其他交通工程中的应用。

6. 组织管理形式

为确保项目高效推进、科研与工程协同落地，建立“三级管理、分工协作、全程管控”的组织管理体系，具体如下：

领导小组

组成人员：陕西省交通运输厅相关业务处室负责人、长安大学科研管理部门负责人、陕西西公院工程试验检测有限公司科研主管、依托工程项目经理。

主要职责：统筹协调项目总体推进，审批项目重大技术方案与资金使用计划；解决科研与工程衔接中的重大问题（如试验段调整、资源调配等）；定期召开项目推进会，监督项目进度与成果质量；负责项目验收组织协调工作。

技术工作组

组成人员：项目负责人（刘喜）、技术顾问（吴涛、赵佳、雷晓锋）、工程技术负责人（祁春辉、涂智能、白梅力、王磊）、科研骨干（汪明磊、李明轩）、技术应用骨干（何康、付颖嘉）。

主要职责：

科研方面：制定详细科研实施方案与试验计划，开展理论与试验测试，构建数学模型，编制技术指南；定期召开技术研讨会，解决科研过程中的技术难

题：负责学术论文、专利等知识产权申报。

工程方面：将科研成果转化为工程施工技术方案，指导现场试验段施工；监督施工过程中科研要求的落实，采集工程现场数据；反馈工程应用中的技术问题，协助科研方案优化。

协同工作：每季度召开科研与工程对接会，同步更新进度、共享数据；建立技术文档共享平台，确保科研数据与工程资料的实时互通。

执行保障组

组成人员：长安大学实验室管理人员、陕西西公院工程试验检测有限公司试验检测人员、依托工程施工班组、财务管理人员。

主要职责：

试验保障：负责实验室设备调试、维护与试验耗材采购，协助开展室内试验；承担现场试验检测工作（如材料强度测试、裂缝监测数据采集）。

施工保障：按照技术工作组要求，完成试验段 SHGC 材料施工、养护及现场保护，确保施工质量符合科研标准。

资金与后勤保障：严格执行经费预算，负责资金支付与核算；协调科研团队驻场期间的后勤保障，确保工作顺利开展。

监督评估机制

建立“月度进度核查+季度成果评估+年度综合考核”的监督机制：领导小组每月核查项目进度，季度组织专家对科研成果（试验数据、模型构建）与工程应用效果进行评估，年度开展综合考核，及时发现并解决推进中的问题。

引入第三方技术咨询：邀请交通工程、材料科学领域的行业专家组成咨询组，对项目关键技术方案、成果有效性进行论证，确保研究成果的科学性与工程适用性。

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	19.98	合 计	49.98	19.98	30.00
工程配套研究经费	0	1.设备费	5.0	0	5.0
单位自筹	30.00	（1）购置设备费	5	0	5
其他经费	0	（2）设备改造与租赁费	0	0	0
		2.业务费	27.28	13.28	14.0
		（1）材料费	19.68	7.68	12.0
		（2）测试化验实验加工费	3.8	1.8	2.0
		（3）燃料动力费	0	0	0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	1.2	1.2	0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	2.6	2.6	0
		（6）其他费用	0	0	0
		3.劳务费	8.8	4.8	4.0
		（1）专家咨询费	0.8	0.8	0
		（2）聘用人员劳务费	8.0	4.0	4.0
		（3）其他劳务费	0	0	0
		（二）间接费用	8.9	1.9	7.0
		4.管理费	4.9	1.9	3.0
		5.绩效支出	4.0	0	4.0

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。

六、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、申请专利授权数（项）	4
		（1）发明专利	2
		（2）实用新型	2
		（3）外观设计	
		2、软件著作权授权数（项）	
		3、发表论文（篇）	3
		（1）其中 SCI 索引收录数	2
		（2）其中 EI 索引收录数	1
		（3）其它	0
		4、著作（部）	
		5、制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	
	其他成果	1、填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	
		2、获奖项数	
		（1）国家奖项	
		（2）部、省奖项	
		（3）地市级奖项	
		3、其他科技成果产出	
		（1）新工艺（或新方法模式）	
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	
		（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	
		(2) 中试（样品样机）	
		(3) 小批量	
		(4) 规模化生产	
	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	5
		(1) 博士、博士后	1
		(2) 硕士	4
		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	
	产业化情况	1、开放共享仪器设备数（台/套/只等）	
		2、科研仪器设备利用率（%）	
		3、孵化科技型企业（个）	
		4、转化科技成果（个）	
效果类指标	经济效益	1、新增产值（万元）	
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

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）

(1) 揭示多元体系碱激发反应机制，明确前驱体配比、碱激发剂参数等对高延性地聚物复合材料（SHGC）微观结构与宏观性能的关联规律，建立 SHGC 基体性能调控方法，使材料抗压强度超 100MPa、抗拉强度超 10MPa、拉伸延性超 10%。

(2) 构建“微观力学参数-单缝开裂性能-多缝开裂行为”的跨尺度计算模型，预测误差控制在 10% 以内；建立考虑再生混凝土缺陷最优分布的强韧化设计方法，实现材料强度与延性协同优化。

(3) 突破仅针对受弯构件的研究局限，拓展至桥梁、隧道、路面、管廊等多类工程场景，形成高延性地聚物功能梯度结构设计方法，明确破坏模式界限特征参数，建立承载力、挠度及裂缝宽度计算模型，编制完成高延性地聚物复合材料工程相关施工技术指南，为工程应用提供精准、标准化的设计与施工依据。

2. 提交的研究成果及其形式

(1) 发表学术论文 3 篇，其中 SCI 索引 2 篇、中文核心期刊 1 篇。

(2) 申请发明专利 2 项、实用新型专利 2 项，形成具有自主知识产权的核心技术体系。

(3) 编制并提交《高延性地聚物复合材料工程施工技术指南》

(4) 培养高层次人才 5 名，其中博士 1 名、硕士 4 名，组建一支兼具材料研发与工程应用能力的专业团队。

3. 经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益

材料成本优化：研发的全固废基高延性地聚物复合材料（SHGC）通过固废资源化利用，有效降低原材料采购与生产成本，相较于传统高延性水泥基复合材料具备显著价格优势，可为工程建设与养护项目节约材料投入。研发的全固废基 SHGC 材料成本较传统高延性水泥基复合材料降低 20% 以上，单公里路面修复可节约材料成本 20% 以上，单座中小桥梁补强可节约材料成本 15% 以上；

运维成本降低：凭借优异的力学性能与耐久性，SHGC 材料能大减少后续维修、翻新的频次与规模，降低全生命周期运维投入，使交通基础设施服役寿命延长 20 年以上，工程全生命周期运维成本降低 30% 以上。

(2) 社会效益

保障交通运行安全：通过改善交通工程结构的抗裂性、承载力与耐久性，减少桥梁、隧道等关键设施的病害风险，降低交通中断与安全事故发生概率，为公众出行与货物运输提供更可靠的保障。

推动行业技术进步：构建的 SHGC 材料研发、设计与应用技术体系，填补了公路工程多场景应用的技术空白，编制的施工技术指南为行业提供标准化支撑，引领交通基础设施向高性能、低损耗、绿色化方向转型；

强化人才与技术储备：培养 5 名高层次复合型科研与工程技术人才，为交通领域绿色发展提供智力支撑；形成的技术成果与工程经验可作为同类项目的参考范例，提升行业整体技术水平。

八、其它需要说明的问题

无

九、申请单位意见



单位负责人：（签字）

陈建忠

年 月 日 科研项目专用章

高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究

大纲评审意见

2026年3月19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“高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究”（项目编号：25-29K）项目大纲评审会。与会专家（名单附后）听取了项目组的汇报，审阅了项目研究大纲，经质询讨论，形成如下评审意见。

一、项目研究内容全面，研究目标明确，技术路线可行。

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

三、预期成果覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1.梳理研究内容，突出研究重点；
- 2.进一步调整项目成果及提供形式。

主任委员： 

2026年3月19日

专家审查意见表

项目名称	高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究				
专家姓名	景宪君	职务/职称	教授	专业	道路工程
专家单位	西安科技大学			联系电话	13689101111

评审意见

新材料在道路工程应用较多，本项目属于材料研究类，开展此项研究，对于必要，需要研究大纲评审，建议如下：

1. 与投标文件研究内容相对比；
2. 研究大纲中撰写内容是否合理清楚，重点突出，结构清晰；
3. 应补充完善技术内容，明确研究内容；

4. 研究成果形式应有具体技术措施，其措施数量较多，能否完成？请尽力而为！

5. 经济效益效益，应有明确的具体或预计数字，请补充！

评审专家（签字）： 景宪君

2026年3月19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	高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究				
专家姓名	张凤振	职务/职称	正高工	专业	材料学
专家单位	陕西高速公路工程试验检测有限公司			联系电话	1839308280

评审意见

项目内容较明晰，条理明确，针对性强，问题立谈。具体还有以下内容需明确。

1. 本项目增加了纤维，可能是一种或几种，但是在纤维与地聚物之界面改善，如何操作？

2. 功能梯度具体有哪些指标？

3. 实施方案中，针对高延性，动态模量等参数，应如何解释？耐久性？

增加相应的评价方法。

4. 设计方法可升格为使用或施工指南。

评审专家（签字）：

张凤振

2016年3月19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	《高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究》				
专家姓名	裴晓梅	职务/职称	高工	专 业	公路工程
专家单位	西安市公路局			联系电话	18681872850

评 审 意 见

25-29K 项目《高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究》，研究内容实用，研究大纲内容较全面。

建议：一、对固体废物利用，添加粉煤灰、矿渣、旧砼等，以及添加钢纤维砼分开研究，因为使用的场景不同，研究性能侧重点也不同。

二、在试验室完成了一部分力学性能试验，在工程实践中，应考虑原材料、配合比等，并完善补充全面的砼试验内容，来验证材料的性能，使之性能可靠，具备推广价值。如，原材料试验，拌合物性能试验、力学性能试验、耐久性能试验，长期性能和特殊性能试验等。

评审专家（签字）：裴晓梅

2026 年 3 月 19 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	高速铁路桥梁组合材料结构应用关键技术研究				
专家姓名	高忠印	职务/职称	教授	专业	交通运输工程
专家单位	同济大学			联系电话	13918264820

评审意见

1. 项目选题创新的程度大旧内容多, 技术路线可行, 研究目标明确. 同意通过研究大旧评审.

2. 建议:

(1) 应进一步明确的研究材料的应用场景, 针对具体的工程问题开展研发工作.

(2) 研究有些过于偏理论方面的研究. 宜针对具体应用技术方案开展工程应用技术研究.

(3) 方案中应明确“受弯构件”, 似应明确.

评审专家(签字): 高忠印

2020 年 3 月 9 日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

高延性低聚物复合材料性能与应用关键技术研究 (项目编号: 25-29K)

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	景宏君	西安科技大学	道路工程	道路工程 材料	教授	
2	委员	张国宏	陕西高速公路工程试验检测有限公司	材料学	道路工程	正高工	
3	委员	裴晓梅	西安市公路局	公路与城市 道路工程	公路工程	正高工	
4	委员	闫卫喜	天津高速集团	土木工程	道桥工程	正高工	线上会议
5	委员	郭忠印	同济大学	交通运输 工程	交通运输 工程	教授	线上会议

专家意见处理表

项目名称：高延性地聚物复合材料性能与应用关键技术研究（项目编号：25-29K）

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	景宏君	1.与投标文件研究内容应相对应; 2.研究大纲的撰写, 应注重条理清楚, 重点突出, 结构科学规范; 3.应补充工程应用技术内容, 明确应用场景; 4.成果形式应有施工技术指南, 其它指标数量较多, 能否完成? 请斟酌; 5.经济社会效益, 应有明确的量化或衡量指标, 请补充!	1. 将研究大纲所有核心研究内容、技术方向、研究目标、应用场景与投标文件保持高度对应。 2. 重构大纲整体框架, 按“背景与必要性-前期基础-实施方案-依托工程-组织管理-经费-绩效-预期成果”的逻辑展开, 条理清晰; 每章节聚焦核心研究内容, 删除冗余表述, 突出“界面改善、分场景研究、工程化落地、施工指南编制”等重点; 规范图表、指标、试验方案的表述形式, 确保结构科学, 符合科研大纲编制要求。 3. 突破原有仅针对受弯构件的研究局限, 明确桥梁受拉区、隧道衬砌、公路路面核心工程应用场景。 4. 新增成果形式: 编制并提交高延性地聚物复合材料工程施工相关技术指南, 作为核心工程化成果。 5. 新增“有关技术经济指标-经济社会效益定量衡量指标”章节, 从固废利用率、碳排放降低率、材料成本降低率、运维成本降低率、年消耗固废量、年替代水泥量等方面建立定量指标体系。

2	张国宏	1 本项目掺加了纤维，可能是一种或几种，但是在纤维与地聚物的界面改善，如何操作？ 2.功能梯度具体有哪些指标？ 3.实施方案中，针对高延性（是否下降）、动态模量（耐久性）等指标，应增加相应的评价方法。 4.设计方法可升级为使用或施工指南。	1.本文主要考虑掺入 PE 和 PVA 纤维，设计物理刻蚀、化学改性方法，通过单丝拔出试验、SEM 微观观测等手段，量化不同方法的界面粘结性能提升效果，确定最优界面改善技术方案。 2. 明确功能梯度结构的核心量化指标，共 4 项：性能梯度变化率、功能区厚度占比、界面粘结强度、梯度层力学性能匹配度。 3.新增“关键指标定量评价方法”为核心研究内容，建立高延性保留率、动态模量衰减率的定量评价方法。 4.新增“施工技术指南编制”专项工作，依托室内试验与依托工程试点应用，系统梳理施工流程、质量控制要点、验收标准。
3	裴晓梅	1.对固废物利用，添加粉煤灰、矿渣、旧砼等，以及添加钢纤维砼分开研究，因为使用的场景不同，研究性能侧重点也不同。 2. 在试验室完成了一部分力学性能试验，在工程实践中，应考虑原材料、配合比等，并完善补充全面的砼试验内容，来验证材料的性能，使之性能可靠，具备推广价值。如，原材料试验，拌合物性能试验、力学性能试验、耐久性性能试验，长期性能和特殊性能试验等。	1.针对不同工程场景明确研究侧重点：纤维砼聚焦重载结构（如桥梁主梁）的补强、高承载力需求；固废基 SHGC 聚焦普通构件抗裂、路面薄层修复、隧道衬砌等场景的低碳、抗裂需求。 2.完善了工程化全性能试验体系，补充所有建议的试验内容：原材料试验、拌合物性能试验、力学性能试验、耐久性能试验、长期性能和特殊性能试验。

4	闫卫喜	1.建议成果文件增加相关标准指南的编制。	1.新增“施工技术指南编制”专项工作，依托室内试验与依托工程试点应用，系统梳理施工流程、质量控制要点、验收标准。
5	郭忠印	1.应进一步明确所研究的材料的应用场景，针对具体的工程问题开展研发工作。 2.研究有些过于偏理论方面的研究，需针对具体应用技术方案开展工程应用技术研究。 3.方案中只提到“受弯构件”，应用受限。	1.进一步细化并明确四大核心工程应用场景，并对应具体工程问题：桥梁受拉区：解决混凝土开裂、承载力不足问题；隧道衬砌：解决衬砌破损、渗漏水、耐久性问题；-公路路面：解决水泥混凝土路面断板、坑槽、薄层修复问题。 2.大幅增加工程应用技术研究内容，新增“SHGC工程应用技术与施工工艺研发”章节。 3.突破仅针对受弯构件的研究局限，将应用范围拓展至桥梁受拉区、隧道衬砌、公路路面等多类工程结构。

项目负责人（签字）： 刘喜

2024.12.27