

项目合同编号：25-88K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究

承担单位：陕西高速公路工程试验检测有限公司

项目负责人：路鑫

通讯邮编、地址：710086 陕西省西安市沣东新城丰产路 57 号

传真、电话：029-89309132

起止年限：2026 年 03 月至 2028 年 03 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) 地聚合物胶凝体系与钢渣稳定化协同设计；
- (2) 地聚合物稳定钢渣材料的多尺度性能探究；
- (3) 地聚合物稳定钢渣材料综合效益研究与工程验证。

2. 技术关键

- (1) 基于多源固废特性分析与响应面法耦合的地聚合物胶凝体系设计；
- (2) 基于钢渣骨料-地聚合物界面调控的协同优化。

3. 依托工程（依托工作）

依托韩城市普通国道大中修工程和 G30 连霍高速阜寨互通式立交工程。

二、考核指标

1.预期目标

项目以钢渣骨料与地聚合物胶凝材料为核心，开展半刚性基层材料配合比设计与性能优化研究。在整合前期研究成果、理论分析及实体工程应用现状的基础上，对材料性能和作用机理进行深入研究，形成一系列具有工程实用价值的研究成果，预期达到以下目标：

（1）提出一种符合半刚性基层材料使用要求的地聚合物稳定钢渣混合料设计方法；

（2）建立面向半刚性基层应用的钢渣骨料进场预选与适配性评价指标。

2.主要技术经济指标

（1）实现钢渣对天然碎石骨料的高比例替代，最优工程配合比下钢渣替代率 $\geq 30\%$ ；

（2）混合料干缩系数 $<$ 传统水泥稳定碎石对照组；

3.经济和社会效益

（1）经济效益

项目通过优化地聚合物胶凝体系配比、明确钢渣进场预选技术指标、完善钢渣预处理工艺，验证材料相较于传统水泥稳定碎石基层的成本优势，形成适配公路工程的材料设计方案，进一步控制各类辅料与加工环节带来的额外成本。同时通过材料性能优化，为降低公路全生命周期运维成本提供支撑，也为钢渣固废提供高值化应用渠道，具备良好的产业经济带动价值。

（2）社会效益

项目契合国家“双碳”战略与大宗固废综合利用政策导向，通过钢渣等工业固废资源化利用，减少天然砂石开采与固废堆存的生态影响，具备显著碳减排潜力；通过重金属浸出特性试验，论证材料的环境安全性，为技术规模化推

广提供环保安全支撑。地聚合物稳定钢渣材料具有优异的抗裂性能，可延长路面平整度的保持时间，提升行车舒适性与通行安全性。项目形成的成套技术为固废在交通领域的应用提供新方法，助力区域循环经济发展。

4.成果提供形式

- (1) 《地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究》总报告 1 份；
- (2) 《地聚合物稳定钢渣半刚性基层施工技术指南》1 份；
- (3) 发表学术论文 1 篇；
- (4) 申请专利 1 项。

5.其他考核指标

- (1) 培养中级职称人才 1 名。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 03 月- 2026 年 07 月	（1）检索、收集国内外相关文献，省内外调研； （2）撰写项目可行性研究报告，完成项目的立项工作； （3）编写研究大纲和工作实施详细计划。
2026 年 08 月- 2027 年 03 月	（1）明确钢渣使用预选技术指标，确定钢渣稳定化预处理工艺； （2）优选胶凝材料比例、碱激发剂掺量等参数，确定地聚合物配合比； （3）确定地聚合物稳定钢渣材料最佳配合比。
2027 年 04 月- 2027 年 10 月	（1）研究不同因素对地聚合物稳定钢渣材料综合性能的影响； （2）探索地聚合物稳定钢渣混合料的微观结构和化学组成演变特征； （3）选取依托工程开展现场验证。
2027 年 11 月- 2028 年 03 月	（1）研究地聚合物稳定钢渣材料的综合效益； （2）撰写研究报告及相关材料； （3）项目总结验收。

四、项目经费

项目总经费：100 万元
交通运输厅补助：19.99 万元
自筹资金：80.01 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	95.0	18.99
1. 设备费	5.0	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	5.0	0.0
2. 业务费	65.0	11.0
(4) 材料支出	12.0	0.0
(5) 测试化验实验加工支出	6.0	0.6
(6) 燃料及动力支出	2.0	0.4
(7) 差旅支出	10.0	3.0
(8) 会议支出	5.0	2.0
(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	25.0	3.0
(11) 其他支出	5.0	2.0
3. 劳务费	25.0	7.99
(12) 劳务性支出	20.0	6.99
(13) 咨询专家支出	5.0	1.0
(二) 间接费用	5.0	1.0
4. 管理费	1.0	0.2
5. 绩效支出	4.0	0.8
合 计	100.0	19.99

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	1
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	0
		3.发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	1
		4.著作（部）	0
		5.制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	/
		（1）国际	/
		（2）国家	/
		（3）省级	/
		2.获奖项数	/
		（1）国家奖项	/
		（2）部、省奖项	/
		（3）地市级奖项	/
		3.其他科技成果产出	/
		（1）新工艺（或新方法模式）	/
		（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	否
		(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	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	1
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	1
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		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	无		

六、承担单位或研究人员分工

1. 陕西高速公路工程试验检测有限公司（牵头单位）

- （1）负责项目总体申报、组织协调、进度管理与全流程技术总把关；
- （2）负责材料现场成型、压实工艺等现场核心施工参数的优化研究；
- （3）负责项目总研究报告、专利成果的统筹编制与申报工作；
- （4）负责项目结题验收、成果集成与行业推广应用全流程工作。

2. 韩城市公路局、陕西西咸交通建设有限公司（参与单位）

- （1）负责提供项目试验路段，协调保障现场试验所需条件；
- （2）协助开展现场试验、数据采集与技术方案的工程化验证工作；
- （3）提供工程实施过程中的现场应用反馈，支撑技术工艺的现场优化；
- （4）协助项目成果在管辖路段的试点应用，配合完成项目结题验收工作。

3. 长安大学、西安建筑科技大学（参与单位）

- （1）负责前期国内外研究现状调研、文献资料收集与技术路线可行性论证；
- （2）负责材料室内试验、微观结构表征与宏观力学性能的系统测试分析；
- （3）负责材料强度形成、性能衰变机理的理论研究与试验数据分析；
- （4）参与项目技术方案优化、学术论文撰写与研究报告编制工作；
- （5）配合完成项目结题验收相关的技术支撑工作。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西高速公路工程试验检测有限公司（牵头单位）							
参与单位（排序）：韩城市公路局、陕西西咸交通建设有限公司、长安大学、西安建筑科技大学							
项目负责人							
序号	姓 名	出生年月	工作单位	职称/职务	专 业	在项目中担任具体工作	签名
1	路鑫	1985-06-03	陕西高速公路工程试验检测有限公司	正高级	公路工程	项目负责人	路鑫
主要研究人员							
2	侯亚民	1974-03-26	韩城市公路局	副高级	桥梁工程	项目参与人员	侯亚民
3	张红维	1975-04-19	韩城市公路局	正高级	规划与管理	项目参与人员	张红维
4	强焯	1985-07-26	陕西西咸交通建设有限公司	副高级	道路工程	项目参与人员	强焯
5	田耀刚	1978-06-11	长安大学	正高级	道路工程（路基）	项目参与人员	田耀刚
6	刘文涛	1984-11-23	陕西西咸交通建设有限公司	副高级	桥梁工程	项目参与人员	刘文涛
7	王成	1988-05-12	陕西西咸交通建设有限公司	副高级	公路工程	项目参与人员	王成
8	严威	1969-10-16	韩城市公路局	中级	道路工程（路面）	项目参与人员	严威

9	侯伟浪	1994-03-09	韩城市公路局	助理级	道路工程（路面）	项目参与人员	侯伟浪
10	张睿轩	2000-07-24	长安大学	博士研究生	交通运输工程	项目参与人员	张睿轩
11	宗有杰	1993-05-08	西安建筑科技大学	讲师	交通运输工程	项目参与人员	宗有杰
12	耿兰	1987-06-10	韩城市公路局	中级	道路工程（路基）	项目参与人员	耿兰
13	陈豪	1989-06-05	陕西高速公路工程 试验检测有限公司	副高级	公路工程	项目参与人员	陈豪
14	李文波	1987-10-15	陕西路桥集团有限公司	副高级	公路工程	项目参与人员	李文波
15	黄晶晶	1999-10-02	陕西高速公路工程 试验检测有限公司	助理级	材料化学	项目参与人员	黄晶晶
16	李斌	1992-08-11	陕西高速公路工程 试验检测有限公司	中级	公路工程	项目参与人员	李斌
17	刘卫刚	1991-08-17	陕西高速公路工程 试验检测有限公司	中级	道路工程（路基）	项目参与人员	刘卫刚
18	张凯	1994-01-23	韩城市公路局	助理级	道路运输	项目参与人员	张凯
19	吴杰	2000-06-20	西安建筑科技大学	博士研究生	材料科学与工程	项目参与人员	吴杰
20	张炜翔	2000-06-12	西安建筑科技大学	硕士研究生	材料与化工	项目参与人员	张炜翔
21	郭雯雯	2001-04-26	陕西高速公路工程 试验检测有限公司	硕士研究生	土木水利	项目参与人员	郭雯雯

八、信息表

项目合同编号		25-88K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部		
项目名称		地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究								
项目实施所在地		陕西省		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月				
总 经 费		100.0 万元		厅 拨		19.99 万元				
第一承担单位	单位名称	陕西高速公路工程试验检测有限公司								
	所在地	陕西省西安市未央区					代码	/		
	通讯地址	陕西省西安市沣东新城建章路街办丰产路 57 号					邮编	710086		
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他					代码	/		
参与单位	序号	单 位 名 称								
	1	韩城市公路局								
	2	陕西西咸交通建设有限公司								
	3	长安大学								
	4	西安建筑科技大学								
项目负责人		姓 名	路鑫		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份	1985 年		
		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	15091850063 029-89309132		电子邮箱		405491870@qq.com			
项目联系人		姓名	黄晶晶		性别		女			
		联系电话	15029270212 029-89309132		电子邮箱		2471669085@qq.com			
项目组人数		21	高级	9	中级	4	初级	3	其他	5
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 地聚合物胶凝体系与钢渣稳定化协同设计; (2) 地聚合物稳定钢渣材料的多尺度性能探究; (3) 地聚合物稳定钢渣材料综合效益研究与工程验证。								
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、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.合同正本一式叁份，甲方单位伍份，承担单位伍份。

7.本合同经双方签章后生效，规定内容执行完毕后自然失效。

十、合同签约各方

合同甲方：



陕西省交通运输厅

负责人：（签字）

李强 2016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） 陕西高速公路工程试验检测有限公司

单位负责人：（签字）

王强 2016年3月27日

项目负责人：（签字）

王强



电 话：15091850063

财务负责人：（签字）

张心乙

账 户 名：

开户银行：

陕西高速公路工程试验检测有限公司
456850100100033592
兴业银行西安经济开发区支行

账 号：

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：

2026 年 3 月 27 日



项目编号: 25-88K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究

申请单位: 陕西高速公路工程试验检测有限公司

联系人: 路鑫

电 话: 029-89309132

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

目 录

一、 项目研究的背景和必要性	1
1.1 项目研究背景和必要性	1
1.2 市场需求前景	2
二、 前期科研及工作基础	3
2.1 国内外研究现状	3
2.2 前期科研及现有工作条件	10
2.3 参考文献	12
三、 实施方案	16
3.1 拟解决的关键问题	16
3.2 主要研究内容及实施方案	17
3.3 关键技术	19
3.4 技术路线	19
四、 项目承担单位及参加单位概况	20
4.1 单位概况	20
4.2 技术力量及人员构成	23
4.3 各自承担的主要工作	24
4.4 项目主要负责人情况	25
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	25
5.1 依托工程概况	25
5.2 投资来源	25
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	25
5.4 组织管理形式	26
六、 项目经费估算及资金筹措情况	28
七、 项目绩效指标	29
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	31
7.1 项目预期目标	31
7.2 提交的研究成果及其形式	31
7.3 经济、社会、环境效益分析	31
九、 其他需要说明的问题	32
十、 申请单位意见	32

一、项目研究的背景和必要性

1.1 项目研究背景和必要性

截至 2023 年底，我国公路通车里程达到 535.5 万公里，其中高速公路建成里程 17.7 万公里，位居世界第一。为加快实现交通强国目标，交通运输部印发了《加快建设交通强国五年行动计划(2023—2027 年)》，引领全国各省市继续推进大规模道路建设。然而，公路交通的飞速发展也带来了一些负面影响，特别是砂石等大宗道路建设原料的供需不平衡现象愈加严重。半刚性基层因承载能力强、稳定性好和抗冲刷能力强等优点，在我国道路建设中得到了广泛应用，约占已通车高速公路基层的 90%。其中，水泥稳定碎石作为最常用的半刚性路面基层材料，由 95%以上的砂石骨料组成，对砂石骨料的消耗量非常大。如今在国家限采政策和砂石资源稀缺现状的影响下，基层工程建设造价大幅上升。因此，寻求路用砂石材料的替代品迫在眉睫。

我国在过去十数年中一直是钢铁产量和年增长率最高的国家。钢铁生产过程中必然产生钢渣废料，其比例大约在粗钢产量的 10%~15%。我国每年产生超过 1 亿吨的钢渣，但大约有 7000 万吨被堆弃，如今累计堆积的钢渣已经超过 18 亿吨，占用的土地面积已经超过了 20 多万亩。然而，由于相关回收再利用技术未能得到有效提高，多年来钢渣的资源化利用率一直低于 30%，与工信部《关于“十四五”大宗工业固体废物综合利用的指导意见》要求达到的 60%的指标仍有较大差距。研究表明，钢渣富含硅酸盐和 RO 相矿物，具有密度大、硬度高、强度好的特点。这些优点恰好满足基层作为道路的主要承重结构层对骨

料的基本要求。因此，采用钢渣替代天然骨料应用于道路基层的前景十分广阔。

地聚合物是一类新型的无机胶凝材料，可以利用含硅铝酸盐的矿物或工业废弃物在较低温度下形成强度。由于具有优良的力学性能，及早强快硬、耐化学腐蚀、抗渗性好、耐高温性好、环境友好等优点，地聚合物已经在建筑材料、耐火隔热材料、高强材料、重金属固化等领域得到了广泛应用。同时，制备地聚合物所需的能源消耗很少，一般只需普通水泥生产能耗的 10%~30%。在环境污染方面，每生产 1t 普通硅酸盐水泥约向大气中排放 1000kg 的 CO_2 ，1kg 的 SO_2 ，2kg 的 NO_x 和大约 10kg 的粉尘。而在地聚合物的生产过程中，由于不用烧制水泥熟料，可减少 90%以上的污染物的排放，是替代水泥成为新型胶凝材料的优选。

基于此，本研究拟将钢渣骨料和地聚合物胶凝材料相结合用于半刚性基层混合料，不仅可以实现对钢渣的大规模利用，缓解基层建设对石料和水泥的大量需求，解决钢渣堆放和环保的现实问题，还能减少天然石料的开采和大气污染物的排放，具有十分明显的环境效益、经济效益和社会效益，对实现国家“双碳”战略目标十分有利。

1.2 市场需求前景

随着生态文明建设的纵深推进与“双碳”战略的全面实施，大宗工业固体废物资源化利用已成为推动循环经济发展和减污降碳同的关键环节。在此背景下，公路建设领域对高性能、低成本、环境友好型基层材料的需求日益迫切。

我国公路网规模持续扩大，半刚性基层因其良好的承载能力与抗冲刷性能，长期占据高速公路基层结构的主导地位，其中，水泥稳定碎石作为最常用的半刚性路面基层材料，由 95%以上的砂石骨料组成，对砂石骨料的消耗量非常大。然而，受生态保护红线约束、矿产资源管控趋严及区域供需结构性失衡等因素影响，优质筑路石料价格持续攀升，工程造价压力显著增加。与此同时，钢铁工业每年产生钢渣逾 1 亿吨，累计堆存量已超 18 亿吨，综合利用率长期低于 30%，不仅占用大量土地资源，还存在重金属溶出、粉尘逸散等潜在环境风险。

项目聚焦地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料的设计与性能研究，旨在通过高比例使用钢渣替代天然骨料制备低碳地聚合物胶凝材料，形成兼具工程适用性与资源循环价值的新型基层技术方案。该方向高度契合国家关于推进大宗固废综合利用、降低建材行业碳排放、保障基础设施绿色建造的政策导向，具备明确的工程应用场景，经济社会效益显著，市场需求和推广应用前景广阔。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

（1）钢渣用作骨料的研究现状

钢渣是使用转炉或电炉炼钢过程中，在 1500℃至 1700℃高温下通过加入的氧化造渣剂去除钢水中的杂质而形成的以硅酸盐、铁酸盐等为主要成分的固体废弃物，其主要化学成分有 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 MgO 、 Fe_2O_3 。将钢渣看作骨料应用于道路工程建设中的相关研究始于上世纪 90 年代初。

Barrand B L 研究后指出需将钢渣经过处理消解其内部的膨胀因素后方可用于道路基层中，以此确保基层的稳定性。姜从盛等研究了钢渣的化学成分与稳定性、耐磨性的关系，同时利用钢渣作为部分细骨料研究其对混凝土耐磨性能的影响，结果表明陈化半年以上的钢渣是一种优质耐磨骨料。吴少鹏等对钢渣沥青混凝土的体积稳定性进行了研究，主要从钢渣骨料和钢渣沥青混合料的角度探讨其膨胀特性的调控方法。试验结果表明，通过酸碱中和法可以有效降低钢渣骨料的膨胀性；利用表面改性技术，能够将钢渣膨胀率有效降低 20%~45%；采用粗钢细石沥青混凝土料配比可以将浸水膨胀率降低 30%~40%。魏巍等追踪调查了钢渣铺筑的路面抗滑性能，发现钢渣路面与传统路面相比，其抗滑性能衰减速度较慢，能够显著提高路面的抗滑性能。徐方等选取了不同陈化龄期的武钢钢渣作为研究对象，通过试件裂缝监测和加州承载比 CBR 浸水膨胀率分析，评价了钢渣路面基层材料的安定性能。试验结果表明，钢渣经过半年的陈化后，用作基层材料时，其体积稳定性能明显提高，裂缝数量也显著降低。Santamaría A 研究了含有接近 50% 体积比例的钢渣骨料混合料用作可泵送和自密实混凝土，稠度等级分别为 S4 和 SF2。一年后，产生了大约 60MPa 的抗压强度和 38GPa 的弹性模量，可泵送混合料的长期挠度值约为当前标准规定的最大允许值的 50%，自密实混合料的长期挠度值则小于当前标准规定的最大允许值的 40%。Sant A 等提出了成功制备钢渣混凝土的标准和方法，研究并分析了它们作为结构混凝土的主要特性。最后，提出了数值模拟作为一种有用的方法，根据其成分的用量和特性，估计钢渣

混凝土的粘性及其工作特性。高颖等分别采用两种不同剂量的有机憎水剂对钢渣进行表面改性处理，探究不同改性剂和不同替代方式下水泥稳定碎石钢渣混合料力学性能的变化规律。结果表明：改性处理可降低钢渣吸水能力，提高钢渣体积稳定性，但在水泥稳定碎石基层中不宜采用全部替代的方式。黄优等研究钢渣在半刚性基层中的应用，确定了其在水泥稳定碎石中的最佳替代量，并评价了其力学性能、体积稳定性以及环境影响。试验结果表明，钢渣可在一定程度上改善水泥稳定碎石的强度、刚度和干缩性能；当钢渣掺量为 50% 时，整体力学性能最佳；建议采用大颗粒钢渣（粒径 $>4.75\text{ mm}$ ）和较高的水泥含量，以降低钢渣中的重金属析出对环境污染风险。Fuente-Alonso J A 等研究了用 0.6% 的金属纤维和 0.4% 的合成纤维加固的钢渣混凝土在新鲜和硬化状态下的性能。纤维增强的钢渣混凝土的机械特性表明，它们具有良好的压缩、弯曲和拉伸劈裂强度。此外还显示出良好的韧性、后裂行为和冲击强度，对其耐磨性的测试也取得了合适的结果。用 SEM 对钢渣混凝土混合物进行了表征，以分析其微观结构和纤维的附着力。Li Q 等研究了粉煤灰和不同温度的水分别处理钢渣，通过用不同体积比的预处理钢渣代替碎石，研究了钢渣对水泥稳定基层材料的机械性能和耐久性的影响。结果表明，在钢渣中加入 18% 的粉煤灰可以有效降低膨胀率，预处理后的钢渣可以替代水泥稳定材料中 50% 的碎石。吴旻等通过研究掺入矿渣、粉煤灰和钢渣细料（粒径小于 4.75 mm ）组成的稳定基层的强度发展规律和微观机制，探究了石灰激发作用下的影响。研究发现，适量的石灰可以提高矿渣的水化效率，从而提升早

期强度；同时，粉煤灰具有火山灰效应，而钢渣中的硅酸钙则能够持续与其进行水化反应，提高混合料的后期强度。喻平认为基层的弯拉强度是影响其疲劳寿命的主要因素。钢渣中含有较多的 C_3S 和 C_2S 等水硬胶凝性矿物，这些矿物通过水化反应使混合料中的粘结作用变得更强。通过在水泥稳定的碎石中掺入级配钢渣，可以观察到疲劳寿命随钢渣掺量的增加而增加的趋势。谭波等以广西北海钢渣为研究对象，通过单掺、复掺减缩增强剂研究钢渣路面基层材料强度影响规律。试验结果表明：减缩增强剂复掺的配合比（质量比）为脱硫石膏：早强剂：早期膨胀剂： MgO ：硅灰： $NaOH$ = 17:14.5:17:8.5:14.5:28.5，其在水泥稳定钢渣混合料中的最佳掺量为 8%；减缩增强剂的掺入能够有效地抑制水泥稳定钢渣基层的温缩量和干缩量。

（2）地聚合物胶凝材料研究现状

作为新型胶凝材料，地聚合物的研究一直备受关注，近年来，碱激发地聚合物的性能研究及应用取得了不少成果。

地聚合物普遍具有快凝早强的性能。Davidovits 研究了偏高岭土基地聚合物砂浆固化体的抗压强度，发现在 $20^{\circ}C$ 养护 4h 后即可达到 20MPa，且 28d 抗压强度最大可达 100MPa。郭晓潞等以 90%高钙粉煤灰和 10%热活化污泥复合体系制备地聚合物材料，采用水玻璃激发后在 $75^{\circ}C$ 下养护 24h 的抗压强度就已达 70MPa，而在室温下养护 28d 的抗压强度也可达 52MPa。Zhang 等以磷矿渣制备地聚合物，以 $NaOH$ 和 Na_2SiO_3 为碱激发剂（碱浓度 5%），在掺入 10%普通硅酸盐水泥与 15%石墨尾矿渣制备成试样后，仅养护 12h 抗折强度就达到 3.3MPa，

抗压强度达到 18.6MPa。地聚合物的性能会受到很多因素的影响，如碱激发剂、原材料的活性、养护条件、 Ca^{2+} 含量等诸多因素的影响。Chen 等研究了室温养护下碱激发粉煤灰-矿渣净浆的力学特性。在 20℃ 抗压强度高达 87MPa，其力学特性优于在 60℃ 下的养护的净浆强度。Gotek 等研究发现 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 对碱激发矿渣的反应进程有较大影响。低 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比，水化产物是 C-S-H，高 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ 比是 C-A-S-H 凝胶。王国东等研究了硅、铝原料对地聚合物制备及性能的影响。并以偏高岭土为主要原料，掺入部分粉煤灰和矿渣，以水玻璃为激发剂，制备了偏高岭土地聚合物。结果表明：偏高岭土与粉煤灰的掺合比主要影响早期强度，偏高岭土的含量、水玻璃的模数等因素对地聚合物的凝结性能和后期强度有很大的影响。侯云芬等对不同激发剂对粉煤灰基地聚合物的抗压强度的影响进行了试验研究。研究表明，在合适的激发剂的作用下，利用粉煤灰可以合成具有一定抗压强度的地聚合物。KOH 和 NaOH 纯碱溶液对粉煤灰的激发效果较差，粉煤灰基地聚合物的抗压强度很低。但当 KOH 或 NaOH 与 K_2SiO_3 复配后，可提高粉煤灰基地聚合物的抗压强度。Monasterio 等用不同模数的水玻璃激发矿渣，发现在水化的前两周，产物形成了很复杂的不同的晶型和无定形相。低模数的水玻璃激发产物中形成的晶型量更少，导致早期强度更高。许多学者认为适量的钙组分可发挥较好的增强作用，这主要是由于体系中生成了 C-S-H 凝胶，为地聚合物的形成提供更多的形核位置，促进原料中的硅铝组分的溶出，如 Yang 通过在粉煤灰基地聚合物中加入矿渣，发现了掺入 50% 的矿渣可以显著提升地聚合物的抗渗性

能。原因是 C-S-H 凝胶可以细化地聚合物的内部孔隙。但也有部分学者认为 Ca^{2+} 含量过高时会影响地聚合物缩聚过程，降低聚硅铝酸盐凝胶的聚合度，严重影响地聚合物的强度与耐久性。Carcia-Lodeiro 等认为 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶优先在高钙、硅系统中产生，然而，在富硅、铝系统中，产物由 N-A-S-H 和 C-A-S-H 凝胶主导。凝胶结构的形成受原料的 C/S、S/A 比影响，系统中铝含量高，则 Q4(nAl) 多。

与硅酸盐等材料相比，地聚合物的耐久性也更加优良。Putreas F 等研究了用 NaOH 激发高炉矿渣、粉煤灰与高炉矿渣的混合物，通过对比两种地聚合物（钠水玻璃激发高炉矿渣和 NaOH 激发粉煤灰与高炉矿渣混合物）在侵蚀后的强度发现，NaOH 激发高炉矿渣地聚合物浸泡在硫酸钠侵蚀液中，抗折和抗压强度均出现下降，降低的幅度在 15%~20%。通过 XRD 检测可知，用 NaOH 激发地聚合物时，地聚合物内部主要生成有序的 C-S-H 凝胶。通过压汞试验发现，使用 NaOH 来激发粉煤灰与高炉矿渣混合物的孔隙含量最高，但平均孔隙直径最小。Bascarevic 等研究了粉煤灰基地聚合物在浓度为 50g/L 的硫酸钠溶液中浸泡一年后的微观结构和力学特性的变化，发现粉煤灰基地聚合物的强度下降的原因主要是硅铝酸盐凝胶结构中的 Si-O-Si 键在硫酸盐溶液的长期侵蚀作用下会发生断裂，从而引起硅元素的溶出。与硅酸盐材料相比，地聚合物也具有更加优良的抗冻融性，Sun 等比较了普通硅酸盐水泥与粉煤灰基地聚合物的抗冻融性能，发现 300 次抗冻融循环后的硅酸盐水泥的抗压强度降低 20%，粉煤灰基地聚合物的强度仅下降 5%。Yan 等研究了偏高岭土基地聚合物的抗冻融性能，认为聚合

物的抗冻融性能与孔隙结构的分布形态有明显的内在联系。Nguyen 等对粉煤灰基地聚合物在盐酸环境中的抗侵蚀性能进行了研究结果表明, 在 4mol/L 的盐酸溶液中浸泡 56d 后, 地聚合物试样的抗压强度仅降低 4%, 其耐盐酸侵蚀性能明显优于普通硅酸盐水泥。Bortnovsky 等发现, 偏高岭土基地聚合物在 0.1mol/L 硝酸侵蚀作用下, 会有少量 Na^+ 被置换出来, 并且有部分铝从地聚合物结构中浸出。地聚合物在高浓度酸性介质中的劣化主要与硅铝酸盐的解聚、硅酸离子释放、 Na^+ 或 K^+ 被 H^+ 取代以及地聚合物结构的脱铝过程有关。Okoye 等研究发现在粉煤灰基地聚合物中掺入一定量的硅灰可有效提高其抗硫酸和氯盐侵蚀性能。对于掺入 20% 硅灰的地聚合物, 在 2% H_2SO_4 和 5% NaCl 溶液中浸泡 90d 后, 其抗压强度损失量可忽略不计。

(3) 存在问题

综上所述, 钢渣骨料和地聚合物胶凝材料在道路建设中的研究已经取得了一定的进展, 并有了实际工程经验, 但两者同时应用于基层半刚性混合料的研究工作仍有不足, 需要进一步的探索:

①当前研究成果中鲜少采用地聚合物胶凝材料和钢渣骨料相结合的方式对半刚性基层混合料设计。因此, 对于两者混合后的产物性能特点, 特别是长期性能演变规律和相关作用机理尚不清楚, 需要针对性的研究总结。

②地聚合物胶凝材料强度高、耐久性强, 在替代水泥用于混凝土结构中的研究已经较为成熟。然而相较而言, 无机结合料稳定材料中胶凝材料含量很少, 骨料含量非常多, 钢渣携带的钙源含量对地聚合

物胶凝材料的聚合度是否不利还不得而知，有待深入的探索分析。

2.2 前期科研及现有工作条件

(1) 前期研究工作基础

项目围绕地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料开展了系统性的前期调研与理论论证工作，梳理了国内外钢渣资源化利用、地聚合物胶凝材料在道路工程中应用的相关研究成果，了解了相关技术在强度形成机理、体积稳定性调控等方面的核心研究进展，明确了当前行业内存在的相关问题，确定了项目的研究切入点；同时全面梳理《钢渣应用技术要求》（GB/T 32546-2016）、《公路工程钢渣集料应用技术规范》（JTG/T 3392-2020）等现行国家及相关标准，明确了钢渣用于公路半刚性基层的核心技术参数要求：在体积安定性方面，要求钢渣浸水膨胀率不大于 2.0%，自然陈化期不少于 6 个月，钢渣中游离氧化钙含量不大于 3.0%；在集料物理性能方面，明确了钢渣粗集料压碎值、磨耗值、针片状含量、吸水率等核心指标的规范限值，为项目研究划定了合规的技术基准。

(2) 现有工作条件

陕西高速公路工程试验检测有限公司已牵头建成陕西省智慧交通产业中试基地、陕西省企业技术中心、西安市交通土建结构安全监测技术中心、交通运输部卫星技术行业应用研发中心（参建）、道路桥隧智慧监测省级高校工程研究中心（参建）等科技创新平台。其中：**陕西省智慧交通产业中试基地**于 2024 年 11 月通过陕西省科技厅认定，基地通过联合高校、科研机构与企业，构建技术研发、人才培养与产

业服务协同生态，实现“基础研究-技术攻关-应用场景-成果产业化”无缝衔接，为智慧交通领域提供核心技术攻关与核心装备研发支撑；**陕西省企业技术中心**围绕公司提出的“质量安全与技术服务、智慧+交通、生态环保、养护新材料和新技术”四个业务方向发展，旨在集聚交通行业技术领域人才、孵化高层次科研成果，开展相关科研及行业创新应用，创新推动交通行业技术发展；**西安市交通土建结构安全监测技术中心**融合 GPS-RTK 技术、图像与激光位移监测技术、实时数据传输技术等，构建基于 BIM+GIS 的监测平台，推动交通土建行业工程结构安全监测技术的快速发展，为交通土建工程结构的安全施工和正常运营保驾护航。

项目以陕西高速公路工程试验检测有限公司为主导单位，借助长安大学、陕西西咸交通建设有限公司、西安建筑科技大学、韩城市公路局的各类研究平台和工程体系为保障。韩城市公路局负责管理工程建设，可为该项目的顺利实施提供必要的和充分的工程依托；陕西高速公路工程试验检测有限公司和长安大学拥有道路工程科研、设计以及施工技术的研究人员和各类大、中、小型试验设备。

组建的研究团队将依托陕西高速公路工程试验检测有限公司综合甲级实验室和长安大学“交通部道路结构与材料重点实验室”和“特殊地区公路工程教育部重点实验室”两个省部级试验基地开展相关研究开展相关试验。目前，已具备的与项目开展相关的软硬件试验条件如下：电子能谱仪、扫描电子显微镜、电子探针、X 射线衍射仪、差热分析仪、热重分析仪、压汞仪、显微硬度仪、核磁共振分析、背散

射电子成像分析等能进行各种微观分析研究的仪器，其中大部分在材料学科研究领域具有国内领先水平，达到国际先进水平，能够用于钢渣形态及其与硬化水泥浆体结合状态的研究，以及地聚合物浆体与钢渣骨料界面过渡区的组成与微观结构分析；拥有用于道路基层材料制备的大型设备，以及用于道路材料与结构性能测试的大型加速加载试验系统 HVS Mark VI、小型加速加载试验系统 MMLS3、工业计算机断层扫描成像系统（ICT）、自行设计加工的半刚性基层材料抗冲刷性能试验仪、MTS 材料试验平台、动态电液伺服试验系统，以及 COMSOL Multiphysics 软件和动态数据采集与分析系统等成套的地聚合物稳定钢渣材料制备、物理、力学性能和耐久性试验设备及相关性能模拟分析软件，可开展地聚合物稳定钢渣材料制备及宏观与微观性能测试等系统研究。本研究所需各种试验条件均有充分保证。

研究团队具有丰富的公路工程现场调研与勘测、室内多尺度试验以及现场监控量测经验，可保障项目的顺利实施。研究团队长期从事建筑固废资源化利用与半刚性基层材料设计等研究以及公路工程建设，具有丰富的试验测试经验、理论分析基础和工程建设经验，项目团队组合合理，为项目的顺利开展和关键技术的探索，提供了可靠保障。

2.3 参考文献

[1] Farrand B, Emery J. RECENT IMPROVEMENTS IN QUALITY OF STEEL SLAG AGGREGATE[J]. Transportation Research Record, 1995.

[2] 姜从盛, 彭波, 李春, 等. 钢渣作耐磨集料的研究[J]. 武汉工

业大学学报, 2001, 23(4):4.

[3] 吴少鹏, 崔培德, 谢君, 等. 钢渣集料膨胀抑制方法及混合料体积稳定性研究现状[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10):166-179.

[4] 魏巍, 陈美祝, 李灿华, 等. 钢渣沥青混凝土路面抗滑性能研究[J]. 建材世界, 2010, 31(4):3.

[5] 徐方, 陈志超, 朱婧, 等. 钢渣路面基层材料安定性能试验研究[J]. 混凝土, 2012(9): 4.

[6] Santamaría A, Ortega-López V, Skaf M, et al. The study of properties and behavior of self compacting concrete containing Electric Arc Furnace Slag (EAFS) as aggregate[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2020, 11(1): 231-243.

[7] Santamaría A, Orbe A, Losañez M M, et al. Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate[J]. Materials & Design, 2017, 115: 179-193.

[8] 高颖, 王伟赫, 李彦苍, 等. 聚合物预浸改性钢渣及其混合料的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(10): 1101-1108.

[9] 黄优, 刘朝晖, 柳力, 等. 钢渣-水泥稳定碎石性能及环境影响试验[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2021, 41(5): 11.

[10] Fuente-Alonso J A, Ortega-López V, Skaf M, et al. Performance of fiber-reinforced EAF slag concrete for use in pavements[J]. Construction and Building Materials, 2017, 149: 629-638.

[11] Li Q, Li B, Li X, et al. Microstructure of pretreated steel slag and its influence on mechanical properties of cement stabilized mixture[J]. Construction and Building Materials, 2022, 317: 125799.

- [12] 吴旻, 谢胜华, 葛根旺. 碱激发钢渣矿渣复合基层材料的强度特性及微观机制[J]. 硅酸盐通报, 2021(8): 2640-2646.
- [13] 喻平. 水泥稳定钢渣碎石基层抗疲劳性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- [14] 谭波, 刘祺, 曹忠露, 等. 减缩增强剂应用于钢渣路面基层材料的试验研究[J]. 科学技术与工程, 2022(003): 022.
- [15] Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications[M]. Geopolymer Chemistry and Applications, 2008.
- [16] 郭晓璐, 施惠生. 热活化污泥-高钙粉煤灰地聚合物的性能与机理[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2012, 40(8): 1229-1233.
- [17] ZHANG, Jun, PENG, et al. Effect of Alkali Activator and Admixtures on The Properties of Phosphorous Slag-Based Cementitious Material[C]//The 14th International Congress on the Chemistry of CementICCC 2015.
- [18] Shu, Jian, Chen, et al. Room-temperature-cured Geopolymer with Australian-sourced Fly Ash and Slag[C]//The 14th International Congress on the Chemistry of CementICCC 2015.
- [19] Lukasz, Golek, Jan, et al. The Influence of the Alumina Content on the Alkali Activation Process[C]//The 14th International Congress on the Chemistry of CementICCC 2015.
- [20] 王国东, 樊志国, 卢都友. 硅铝原料对地聚物制备和性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(2): 6.
- [21] 侯云芬, 王栋民, 李俏. 激发剂对粉煤灰基地聚合物抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2007, 10(2): 5.

[22] Manuel, Monasterio, Shuping, et al. The Influence of Water Glass Modulus on the Structure Development of Alkali-activated Slag[C]//The 14th International Congress on the Chemistry of Cement[CCC 2015].

[23] Deb P S, Sarker P K, Barbhuiya S. Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature[J]. Construction & Building Materials, 2015, 101: 675-683.

[24] Song W, Zhu Z, Peng Y, et al. Effect of steel slag on fresh, hardened and microstructural properties of high-calcium fly ash based geopolymers at standard curing condition[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116933.

[25] Tao Y, Xiao Y, Zhang Z. Quantification of chloride diffusion in fly ash-slag-based geopolymers by X-ray fluorescence (XRF)[J]. Construction & Building Materials, 2014, 69(oct.30): 109-115.

[26] Yip C K, Provis J L, Lukey G C, et al. Carbonate mineral addition to metakaolin-based geopolymers[J]. Cement & Concrete Composites, 2008, 30(10): 979-985.

[27] Neithalath, Narayanan, Erdemli, et al. C-(N)-S-H and N-A-S-H gels: Compositions and solubility data at 25 degrees C and 50 degrees C[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2017.

[28] 罗新春, 汪长安, LUOXinchun, 等. 钙含量对偏高岭土/矿渣基地聚合物结构和性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(12): 6.

[29] Garcia-Lodeiro I, Fernández-Jimenez A, Palomo A. Cements with a low clinker content: versatile use of raw materials[J]. Journal of

Sustainable Cement Based Materials, 2015, 4(2): 140-151.

[30] Puertas, Gutiérrez, FernándezJiménez, et al. Alkaline cement mortars. Chemical resistance to sulfate and seawater attack[J]. Materiales De Construcción, 2018, 52(267): 55-71.

[31] Bascarevic Z, Komljenovic M, Miladinovic Z, et al. Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers[J]. Materials and Structures, 2015, 48(3): 683-697.

[32] Sun P, Wu H C. Chemical and freeze–thaw resistance of fly ash-based inorganic mortars[J]. Fuel, 2013.

[33] Yan D, Xie L, Qian X, et al. materials Compositional Dependence of Pore Structure, Strength and Freezing-Thawing Resistance of Metakaolin-Based Geopolymers[J]. Materials, 2020, 13(13): 2973.

[34] Okoye F N, Durgaprasad J, Singh N B. Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete[J]. Ceramics International, 2016.

[35] Ganesan N, Abraham R, Raj S D, et al. Effect of fibres on the strength and behaviour of GPC columns[J]. Magazine of Concrete Research, 2016, 68(1-2): 99-106.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

(1) 钢渣中膨胀组分对地聚合物体系稳定的干扰问题

钢渣中游离氧化钙与氧化镁的双重效应一直是制约其在地聚合物中规模化应用的关键因素。这类组分在碱激发初期通过快速水化形成早期强度支撑，但该类组分的迟发性体积膨胀特性会引发不可逆的微

观结构损伤。此外，钢渣复杂化学组成可能干扰地聚合物正常的缩聚反应，导致材料性能离散。因此，项目拟通过系统研究，明晰游离氧化钙等膨胀组分在碱激发环境下对凝胶结构形成与体积稳定性的影响。在此基础上，建立面向半刚性基层应用的钢渣骨料进场预选与适配性评价指标。

（2）多因素耦合作用下材料长效服役的性能问题

地聚合物稳定钢渣材料在实际应用时，在交通荷载与西部典型环境因素（冻融、干湿循环、盐蚀等）的多因素耦合作用下，其性能衰变情况。项目将重点揭环境因素协同作用下，材料从微观损伤萌生（如微裂纹、界面脱粘）、扩展到宏观性能劣化的主导机制，实现对材料稳定性和耐久性的多角度分析。

3.2 主要研究内容及实施方案

（1）地聚合物胶凝体系与钢渣稳定化协同设计

针对钢渣来源复杂、组分含量波动较大等问题，结合半刚性基层的工程应用要求及地聚合物稳定钢渣材料性能需求，制定钢渣进场预选技术指标体系，明确钢渣基本类型、物理性能等维度的关键指标要求。建立钢渣与地聚合物适配性负面清单，明确钢渣禁用、限用的相关指标阈值。重点分析各类工艺对钢渣膨胀组分的消解效果、体积稳定性的提升作用及其集料性能的影响。

开展地聚合物胶凝体系的协同优化设计，重点研究固废复配比例、碱激发剂关键参数对胶凝材料凝结特性、力学强度、稳定性的影响，开展与传统水泥材料性能的对比分析，明确地聚合物胶凝材料在半刚

性基层应用中的核心优势与适配条件，为后续混合料制备提供稳定的胶凝基材。

（2）地聚合物稳定钢渣材料的多尺度性能探究

以钢渣替代天然碎石骨料、地聚合物胶凝材料替代传统水泥材料为研究重点，系统分析钢渣替代比例、地聚合物掺量、集料级配等关键参数对混合料力学性能及稳定性的影响。通过试验确定兼顾固废最大化消纳与工程安全适用性的最优配合比。通过测试材料的干燥收缩与长期浸水膨胀性能，明确材料的抗裂性能与体积安定性；结合西部地区典型服役环境，开展材料在复杂环境下的耐久性能试验。针对宏观性能中发现的关键问题，采用X射线衍射（XRD）、傅里叶变换红外光谱（FTIR）等微观测试手段开展协同分析，为材料配合比优化与性能调控提供理论支撑。参照国家现行固体废物浸出毒性相关标准，系统开展混合料的重金属浸出特性试验，验证其环境安全性。

（3）地聚合物稳定钢渣材料综合效益研究与工程验证

基于室内试验确定的最优配合比与标准化施工工艺，铺筑试验段，完善标准化施工方法。构建质量控制与检测标准体系，明确各环节核心检测项目、检测频率与合格评价指标。在铺筑完成后，对比分析试验段的长期服役性能，验证室内研究成果的工程适用性，积累现场应用数据。基于全生命周期，开展材料的经济效益与环境效益分析，与传统水泥稳定碎石基层进行对比分析，明确技术的经济优势与规模化应用后的成本优化空间；结合环保安全性试验结果，评估技术的环境友好性。最终形成综合研究报告，为技术的规模化推广提供数据支撑。

3.3 关键技术

(1) 基于多源固废特性分析与响应面法耦合的地聚合物胶凝体系设计

项目以粉煤灰、矿渣、钢渣粉等多种固废为原料，其组分、活性与形态差异巨大，传统“试错法”无法高效协调其胶凝性能与施工和易性矛盾。首先该技术通过 FTIR、XRD 等对原料进行全组分分析，明确活性硅铝源与钙源比例，进而采用响应面法等设计手段，将碱激发剂模数、掺量等多因素进行耦合建模，以凝结时间、抗压强度、干缩率等为优化目标，进行多目标协同优化。解决了从复杂原材料体系中快速、科学确定最佳配比的关键问题，避免了配比设计的盲目性，确保了地聚合物胶凝材料本身性能的可靠性与可控性，为后续混合料设计提供了稳定的原材料。

(2) 基于钢渣骨料-地聚合物界面调控的协同优化

钢渣骨料的颗粒形貌、级配、表面特性及稳定性与地聚合物胶凝体系的适配性是决定路用性能的核心。该技术并非简单地将胶凝材料与骨料混合，而是通过协同设计来提高材料性能。通过预处理工艺调控钢渣骨料的表面活性与体积稳定性；然后，采用从微观到宏观的多尺度分析体系，研究不同钢渣掺量、级配与地聚合物掺量下的力学性能与稳定性分析。在保证最大化利用钢渣骨料的同时，确保混合料获得最优的力学强度与稳定性。

3.4 技术路线

本研究技术路线图如下所示。

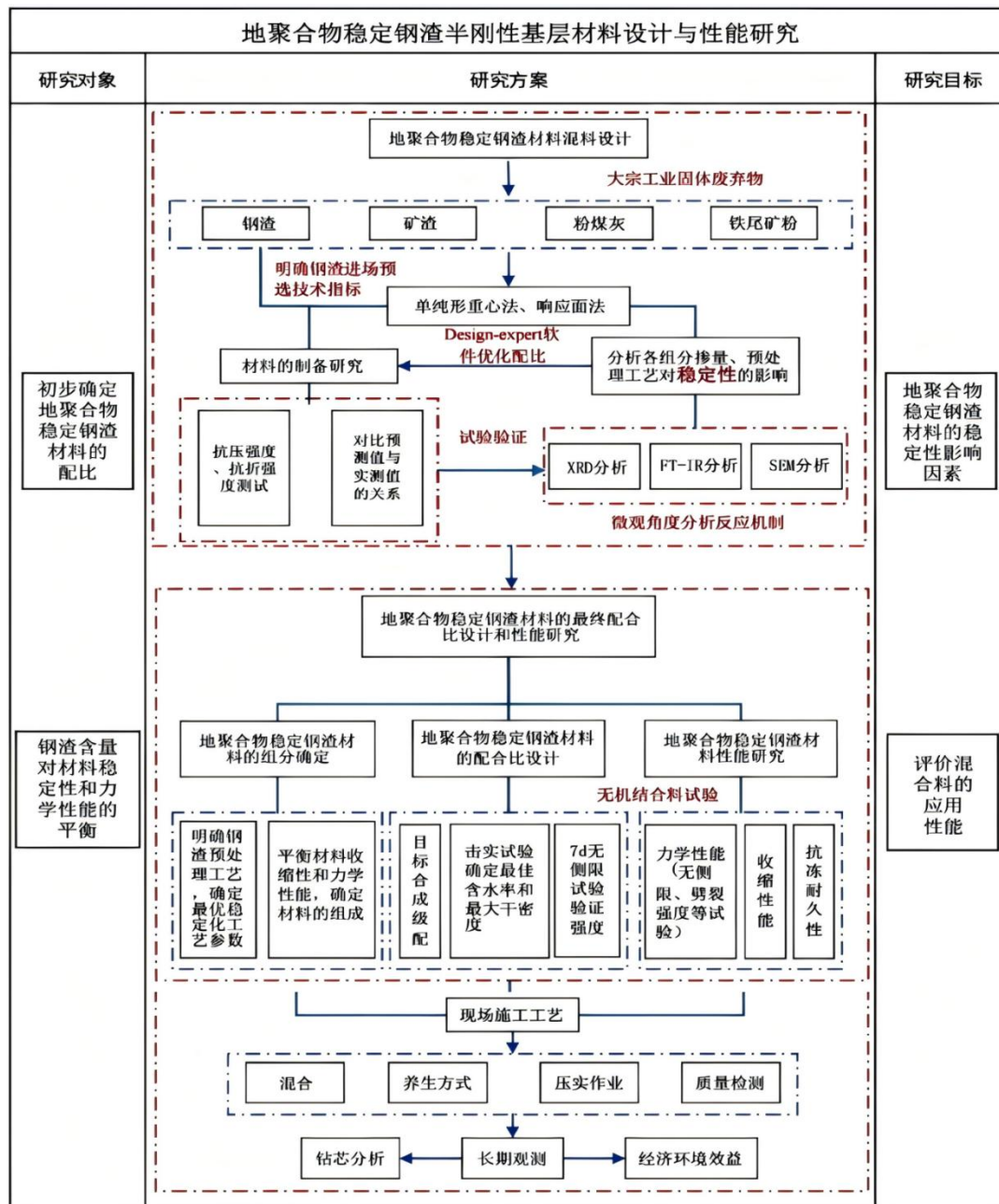


图 1 技术路线图

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

项目由陕西高速公路工程试验检测有限公司、陕西西咸交通建设有限公司、韩城市公路局、长安大学、西安建筑科技大学 5 家单位共

同完成。项目参与人员均为长期从事道路材料试验研究、机械设备设计开发、工程质量管理等工作的高层次人才。研究人员均主持或参与近年的多项国家和省部级科研项目，具有扎实的理论分析研究能力和丰富的工程实践经验。

陕西高速公路工程检验检测有限公司

陕西高速公路工程检验检测有限公司拥有丰富的经验、技术和产品积累，拥有最全的试验检测资质，是行业内全国排名前列的检验检测单位。公司建有独立、现代化的试验室，占地 9000 平方米，建有现场检测道路、桥梁、岩土、隧道、交通工程试验场，拥有各类先进的仪器设备 1690 余台（套）。拥有科学家+工程师”队伍 1 支，博士创新团队 4 支，交控集团青年创新工作室 3 个。获得知识产权 96 项，其中发明专利 6 项，实用新型 40 项，主持完成省地方标准 4 项，主编完成行业标准 1 项，参编完成团体标准 2 项。

另外，公司已牵头建成陕西省智慧交通产业中试基地、陕西省企业技术中心、西安市交通土建结构安全监测技术中心、交通运输部卫星技术行业应用研发中心（参建）、道路桥隧智慧监测省级高校工程研究中心（参建）等科技创新平台，为项目的顺利开展提供了保障。

韩城市公路局侯亚民公路养护创新工作室

韩城市公路局于 2020 年 6 月创建“侯亚民公路养护创新工作室”。工作室前期由局长侯亚民、总工程师张红维带领我局技术骨干力量组成 8 人团队，平均年龄 36 岁，其中包括一名正高级工程师、一名高级工程师、两名工程师、三名助理工程师，均具备大学学历，为公路养

护创新提供有力的人才和技术保障。

长安大学

长安大学直属国家教育部，是教育部和交通运输部共建的国家“211 工程”重点建设大学，拥有交通部道路结构与材料重点实验室、特殊地区公路工程教育部重点实验室、交通铺面材料教育部工程研究中心三个省部级试验基地。试验基地拥有 20 多台大型精密仪器如电子能谱仪、扫描电子显微镜等能进行各种微观分析研究的仪器、设备系统；测试的大型加速加载试验系统 HVS Mark VI、小型加速加载试验系统 MMLS3 等成套的水泥基材料制备、物理、力学性和耐久性试验设备，可开展水泥基材料制备及宏观与微观性能测试等系统研究。本研究所需各种试验条件均有充分保证。

西安建筑科技大学

西安建筑科技大学是我国著名的土木、建筑“老八校”之一。经过并校近 70 年的建设与发展，学校实力不断增强，已经成为一所以土木建筑、环境市政、材料冶金及其相关学科为特色，以工程技术学科为主体，工、管、艺、理、文、法、哲、经、教等学科协调发展的多科性大学。

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，完全可满足本课题室内、外研究工作的需要。项目参与人员均为长期从事道路材料试验研究、机械设备设计开发、工程质量管理等工作的高层次人才。团队在道路原材料检测新技术、公路工程养护与应急救援新材料研发等方向形成系列研究成果。研究人员均主

持或参与近年的多项国家和省部级科研项目，具有扎实的理论分析能力和丰富的工程实践经验。

4.2 技术力量及人员构成

申请项目 负责人	姓名	路鑫	性别	男	年龄	1985-06-03
	职务	科技创新 中心主任	职称	正高级	专业	道路工程（路面）
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
路鑫	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	1985-06-03	正高级	道路工程（路面）	项目负责人
侯亚民	韩城市公路局	男	1974-03-26	副高级	桥梁工程	项目参与人员
张红维	韩城市公路局	女	1975-04-19	正高级	规划与管理	项目参与人员
强焯	陕西西咸交通建设有限公司	男	1985-07-26	副高级	道路工程	项目参与人员
田耀刚	长安大学	男	1978-06-11	正高级	道路工程（路基）	项目参与人员
刘文涛	陕西西咸交通建设有限公司	男	1984-11-23	副高级	桥梁工程	项目参与人员
王成	陕西西咸交通建设有限公司	男	1988-05-12	副高级	公路工程	项目参与人员
严威	韩城市公路局	男	1969-10-16	中级	道路工程（路面）	项目参与人员
侯伟浪	韩城市公路局	男	1994-03-09	助理级	道路工程（路面）	项目参与人员
张睿轩	长安大学	男	2000-07-24	博士研究生	交通运输工程	项目参与人员
宗有杰	西安建筑科技大学	男	1993-05-08	讲师	交通运输工程	项目参与人员
耿兰	韩城市公路局	男	1987-06-10	中级	道路工程（路基）	项目参与人员
陈豪	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	1989-06-05	副高级	公路工程	项目参与人员
李文波	陕西路桥集团有限公司	男	1987-10-15	副高级	公路工程	项目参与人员
黄晶晶	陕西高速公路工程试验检测有限公司	女	1999-10-02	助理级	材料化学	项目参与人员

李斌	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	1992-08-15	中级	公路工程	项目参与人员
刘卫刚	陕西高速公路工程试验检测有限公司	男	1991-08-17	中级	道路工程（路基）	项目参与人员
张凯	韩城市公路局	女	1994-01-23	助理级	道路运输	项目参与人员
吴杰	西安建筑科技大学	男	2000-06-20	博士研究生	材料科学与工程	项目参与人员
张炜翔	西安建筑科技大学	男	2000-06-12	硕士研究生	材料与化工	项目参与人员
郭雯雯	陕西高速公路工程试验检测有限公司	女	2001-04-26	硕士研究生	土木水利	项目参与人员

4.3 各自承担的主要工作

1.陕西高速公路工程试验检测有限公司

- （1）负责项目的申报、组织协调以及整体技术把关；
- （2）负责材料现场成型、压实工艺等参数优化；
- （3）负责科研报告、论文专利的编写工作；
- （4）负责项目的课题鉴定。

2.韩城市公路局、陕西西咸交通建设有限公司

- （1）负责提供试验路段，协调配合现场试验；
- （2）提供工程实施反馈，支持技术工艺优化；
- （3）配合陕西高速公路工程试验检测有限公司进行课题鉴定。

3.长安大学、西安建筑科技大学

- （1）项目前期研究现状资料的收集；
- （2）负责材料微观结构与宏观性能的测试分析；
- （3）参与机理研究、数据分析及技术方案优化；
- （4）负责科研报告、论文专利的编写工作；
- （5）配合陕西高速公路工程试验检测有限公司进行课题鉴定。

4.4 项目主要负责人情况

路鑫，男，1985 年 6 月出生，陕西咸阳人，正高级工程师。主要从事道路检测、科研等工作，近五年主要研究方向为路面典型结构设计方法、智能养护决策系统开发、道路材料研发推广以及碳纳米材料智能监测技术等。作为项目负责人主持陕西省科技厅重点研发计划 2 项、陕西省交通厅科技项目 2 项，作为技术负责人承担陕西省交通厅科技项目 8 项和地方标准 2 项，研发的碳纳米智能监测材料取得省级“三新三小”创新竞赛二等奖，取得发明专利 5 项、实用新型专利 25 项、软件著作权 6 项以及核心期刊论文 20 余篇等科研成果。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程概况

项目依托韩城市普通国道大中修工程和 G30 连霍高速阜寨互通式立交工程。

5.2 投资来源

项目投资 100.00 万元，陕西省交通运输厅补助 19.99 万元，其余 80.01 万元为其他经费。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

项目前期对国内外相关研究资料进行了收集整理，充分掌握了水泥基材料性能特点及制备工艺要点，深入论证了地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料的良好工作性、力学性、耐久性和工程化应用的可行性，并对依托工程的工程背景和施工组织进行了实际了解。项目依托的工程建设正在按计划逐步推进，可如期按以下进度将项目的研究成果在

实体工程中进行应用。

课题研究起止时间为：2026 年 03 月～2028 年 03 月。具体计划进度如下：

（1）2026 年 03 月-2026 年 07 月：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；

（2）2026 年 08 月-2027 年 03 月：明确钢渣使用预选技术指标，确定钢渣稳定化预处理工艺；优选胶凝材料比例、碱激发剂掺量等参数，确定地聚合物配合比；确定地聚合物稳定钢渣材料最佳配合比。

（3）2027 年 04 月-2027 年 10 月：研究不同因素对地聚合物稳定钢渣材料综合性能的影响；探索地聚合物稳定钢渣混合料的微观结构和化学组成演变特征；选取依托工程开展现场验证。

（4）2027 年 11 月-2028 年 03 月：研究地聚合物稳定钢渣材料的综合效益；撰写研究报告及相关材料，项目总结验收。

5.4 组织管理形式

为确保在约定的时间内完成项目工作，项目组拟定下列进度和质量控制措施：

进度管理：

（1）阶段检查，每季度提交阶段性成果和总结计划报告，确认各阶段的科研进度和质量，发现问题及时解决，避免影响总进度；

（2）技术培训，为保证研究顺利进行，定期邀请专家、学者对项目组人员进行培训。

质量管理:

(1) 事先指导: 研发前编写实施方案, 以指导后期工作;

(2) 中间检查: 项目组内部检查、根据检查意见及时修改完善;

(3) 事后把关: 项目组将成果报相关部门进行鉴定, 以鉴定合格为准。

六、项目经费估算及资金筹措情况

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	斤补 经费	其他 经费
省交通运输厅补助	19.99	合 计	100.0	19.99	80.01
工程配套研究经费	0.0	1.设备费	5.0	0.0	4.0
单位自筹	0.0	（1）购置设备费	0.0	0.0	0.0
其他经费	80.01	（2）设备改造与租赁费	5.0	0.0	4.0
		2.业务费	65.0	11.0	54.0
		（1）材料费	12.0	0.0	12.0
		（2）测试化验实验加工费	6.0	0.6	5.4
		（3）燃料动力费	2.0	0.4	1.6
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	15.0	5.0	10.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	25.0	3.0	22.0
		（6）其他费用	5.0	2.0	3.0
		3.劳务费	25.0	7.99	17.01
		（1）专家咨询费	5.0	1.0	4.0
		（2）聘用人员劳务费	20.0	6.99	13.01
		（3）其他劳务费	0.0	0.0	0.0
		（二）间接费用	5.0	1.0	4.0
		4.管理费	1.0	0.2	0.8
		5.绩效支出	4.0	0.8	3.2

注：预算编制按照《陕西省人民政府关于改进加强省级财政科技计划和项目资金管理的实施意见》（陕政发[2017]22号）文件执行。

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	1
		（2）实用新型	0
		（3）外观设计	0
		2、软件著作权授权数（项）	0
		3、发表论文（篇）	1
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其它	1
		4、著作（部）	0
		5、制订标准数（项）	1
		（1）国际标准	0
		（2）国家标准	0
		（3）行业标准	0
		（4）地方标准	0
		（5）企业标准	0
		（6）科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	/
		（1）国际	/
		（2）国家	/
		（3）省级	/
		2、获奖项数	/
		（1）国家奖项	/
		（2）部、省奖项	/
		（3）地市级奖项	/
		3、其他科技成果产出	/
		（1）新工艺（或新方法模式）	/
		（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	否
		(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	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2、培养高层次人才	1
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	1
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	0
		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	无		

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

7.1 项目预期目标

项目以钢渣骨料与地聚合物胶凝材料为核心，开展半刚性基层材料配合比设计与性能优化研究。在整合前期研究成果、理论分析及实体工程应用现状的基础上，对材料性能和作用机理进行深入研究，形成一系列具有工程实用价值的研究成果，预期达到以下目标：

（1）提出一种符合半刚性基层材料使用要求的地聚合物稳定钢渣混合料设计方法；

（2）建立面向半刚性基层应用的钢渣骨料进场预选与适配性评价指标。

7.2 提交的研究成果及其形式

（1）《地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究》总报告；

（2）《地聚合物稳定钢渣半刚性基层施工技术指南》1份；

（3）发表论文1篇；

（4）申请专利1项。

7.3 经济、社会、环境效益分析

（1）经济效益

项目通过优化地聚合物胶凝体系配比、明确钢渣进场预选技术指标、完善钢渣预处理工艺，验证材料相较于传统水泥稳定碎石基层的成本优势，形成适配公路工程的材料设计方案，进一步控制各类辅料与加工环节带来的额外成本。同时通过材料性能优化，为降低公路全

生命周期运维成本提供支撑，也为钢渣固废提供高值化应用渠道，具备良好的产业经济带价值。

（2）社会及环境效益

项目契合国家“双碳”战略与大宗固废综合利用政策导向，通过钢渣等工业固废资源化利用，减少天然砂石开采与固废堆存的生态影响，具备显著碳减排潜力；通过重金属浸出特性试验，论证材料的环境安全性，为技术规模化推广提供环保安全支撑。地聚合物稳定钢渣材料具有优异的抗裂性能，可延长路面平整度的保持时间，提升行车舒适性与通行安全性。项目形成的成套技术为固废在交通领域的应用提供新方法，助力区域循环经济发展。

九、其他需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

项目依托工程及配套经费已落实，实施所需条件已到位，预期目标明确，研究方案可行，申报资料真实可靠，能够达到预期成果。

单位负责人  (签字)

年 月 日

地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究

大纲评审意见

2026年03月10日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究”（项目编号：25-88K）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、项目研究内容比较全面，研究目标较为明确，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、预期成果基本覆盖研究目标，与研究内容的逻辑框架相契合。

与会专家一致同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

1. 提出钢渣的预选和预处理量化技术指标；
2. 进一步开展经济环保效益分析。

主任委员：2585A

2026年03月10日

专家审查意见表

项目名称	地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究				
专家姓名	陈海晨	职务/职称	正高	专 业	道路工程
专家单位	西安公路研究院有限公司			联系电话	1391855657

评审意见

项目针对钢渣在刚性基层中应用,进行地聚物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究,具有创新性和实用性.

1. 细化钢渣预处理工艺的研究

2. 完善地聚合物胶结体系,的协同优化设计. 研发出新型的地聚合物胶结料.

3. 进一步完善材料的质量控制与检测标准

4. 补充前期研究工作基础

评审专家(签字): 陈海晨

2026年3月10日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究				
专家姓名	景宏君	职务/职称	教授	专业	道路工程
专家单位	西安科技大学			联系电话	13689101111

评审意见

大剂固废(综合应用),近年新规范多,本项目老于相关现状,开展相应技术研究,亟须必要,同意开展,建议如下:

1. 聚变钢渣的基本性能! 来源及稳定性问题;

2. 技术路线图不规范,进行修改;

3. 明确钢渣胶结剂交并式有液工技术指南;

4. 论述钢渣基层对环境的影响问题。

评审专家(签字): 景宏君

2026 年 3 月 10 日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究				
专家姓名		职务/职称	教授	专业	道法工程
专家单位	山东大学			联系电话	1308751138

评审意见

本项目开展地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究，充分利用工业固废，具有较好地推广应用前景。

本项目研究内容全面，技术方案合理，前期研究基础较好，1. 稳定钢渣应用广泛，值得推广。

建议：

1. 明确可用于半刚性基层的钢渣的技术要求，如堆积密度、含水率等；
2. 地聚合物与水泥砂浆材料相比有优势，在用于半刚性基层方面。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 10 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	地聚物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究				
专家姓名	吴传海	职务/职称	总工/教高	专 业	道路工程
专家单位	广东华路交通科技有限公司			联系电话	13822141956

评 审 意 见

一、本项目将钢渣骨料和地聚合物胶凝材料相结合用于半刚性基层混合料，不仅可以实现对钢渣的大规模利用，缓解基层建设对石料和水泥的大量需求，解决钢渣堆放和环保的现实问题，还能减少天然石料的开采和大气污染物的排放，具有十分明显的环境效益、经济效益和社会效益，研究工作具有一定必要性，大纲编写较为合理，方案实施具有可行性。

二、钢渣种类繁多，不同化学物质成份的占比也不同，建议通过研究建立钢渣成分及占比与地聚物适配的负面清单，以便业主放心使用。

三、地聚物稳定钢渣材料的宏观性能研究主要侧重的是传统的强度、模量等力学指标，建议增加其体积稳定性和长期耐久性方面的性能研究。

四、地聚物稳定钢渣材料除了社会效益较好外，其技术经济性相比传统半刚性基层材料也具有较好的优势，建议进一步挖掘。

评审专家（签字）：

2016 年 3 月 10 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表（25-88K）

项目名称	地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究				
专家姓名	王松根	职务/职称	研究员	专 业	公路工程
专家单位	原山东省交通厅公路局			联系电话	13488700091

评 审 意 见

本项目拟将钢渣骨料和地聚合物胶凝材料相结合用于道路路面半刚性基层混合料，项目研究具有一定的创新性。不仅可以实现对钢渣的大规模利用，缓解基层建设对石料和水泥的大量需求，解决钢渣堆放和环保的现实问题，还能减少天然石料的开采和大气污染物的排放，具有十分明显的环境效益、经济效益和社会效益。

提交的研究大纲，研究内容较全面、技术路线和实施方案可行，项目承担单位和研究团队人员组成可满足项目研究要求，工作基础扎实，依托工程和研究经费已落实，具备开展项目研究的条件。

同意该项目研究大纲通过评审。

建议：

- 1. 进一步加强地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料的稳定性分析。
- 2. 补充对钢渣材料的基本技术要求和钢渣预处理工艺技术，细化不同配比材料的室内实验方案。
- 3. 进一步补充地聚合物稳定钢渣半刚性基层环保性分析。
- 4. 进一步开展地聚合物稳定钢渣半刚性基层的经济效益分析。

评审专家（签字）：

王松根

2026 年 03 月 10 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究 (项目编号: 25-88K)

大纲评审专家委员会名单

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

评审会参会人员签到表

姓 名	职称/职务	工作单位	联系电话
徐海晨	正高	西安公路研究所	1391855657
景克君	教授	西安科技大学	13689101111
叶明	教授	长安大学	1308751538
齐娟	正高	省公路局	13991366181
张文卓	干事	陕西省公路局	17342321012
王海松	高工	陕西省公路局	13609198517
马彦	正高工	陕西高速检测公司	1501850063
黄晶晶	初级	陕西高速公路工程试验检测公司	15029270212

年 月 日

专 家 意 见 处 理 表

项目名称：地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料设计与性能研究（项目编号：25-88K）

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	弥海晨	1.细化钢渣预处理工艺的量化研究； 2.完善地聚合物胶凝体系的协同优化设计，研发出相应的地聚物胶凝。 3.进一步突出材料的质量控制与检测标准； 4.补充前期研究工作基础；	1.已在 3.2 节主要研究内容中细化了钢渣预处理工艺的研究方案，明确将以膨胀组分消解率、体积稳定性提升效果、集料性能影响为核心评价指标，系统开展不同预处理工艺的对比试验，明确各类工艺的适用条件与核心控制参数，形成可落地的预处理工艺技术要求； 2.已将该内容纳入项目核心研究目标，在 3.2 节与 3.3 节关键技术中完善了地聚合物胶凝体系协同优化设计的研究内容，明确将以粉煤灰、矿渣等多源固废为原料，重点研究固废复配比例、碱激发剂的低成本选择以及关键参数优化对胶凝材料性能的影响，通过多目标协同优化，研发适配半刚性基层应用的地聚合物胶凝材料，形成成熟的胶凝体系设计方法与生产工艺； 3.已在 3.2 节工程验证研究内容中补充了相关研究内容，明确将构建覆盖质量控制与检测标准体系，划定各环节核心检测项目、检测频率与合格评价指标，突出材料全流程质量管控的主线； 4.已在 2.2 节中，补充完善了前期研究工作基础相关内容，系统梳理了项目前期开展的国内外文献与行业标准调研、核心技术参数对标（浸水膨胀率$\leq 2.0\%$、自然陈化期≥ 6 个月、游离氧化钙≤ 3.0 等）、研究切入点梳理等工作，明确了项目的理论参考依据与实施可行性，为项目正式开展奠定了扎实的前期基础。
2	王振军	1. 明确可用于半刚性基层的钢渣的技术指标，如体积稳定性等；	1.已在 2.2 节前期研究基础与 3.2 节研究内容中,明确了可用于半刚性基层的钢渣核心技术指标，重点突出了体积安定性关键要求，包括钢渣浸水膨胀率、自然陈化期、游

		2.地聚合物与传统水泥材料相比有何优势，在用于半刚性基层方面。	离氧化钙含量等核心参数（浸水膨胀率$\leq 2.0\%$、自然陈化期≥ 6个月、游离氧化钙$\leq 3.0\%$等）；同时明确了钢渣物理性能、集料特性等相关技术指标的研究规划（压碎值$\leq 26\%$、磨耗值$\leq 30\%$等），将在项目实施中形成标准化的钢渣准入技术要求； 2.根据已有研究成果，地聚合物可对钢渣骨料可以形成致密包覆结构，同时激发钢渣潜在活性与体系发生交联作用，界面结合强度显著优于水泥的物理包裹；在体积稳定性、抗裂性、耐久性及低碳环保方面优势突出。
3	景宏君	1.聚焦钢渣从基本性能来源及稳定性问题； 2.技术路线图不规范，需修改； 3.明确成果提交形式为施工技术指南； 4.论证钢渣基层对环境的污染问题。	1.已在 3.1 节拟解决的关键问题中，将钢渣基本性能、来源波动特征与体积稳定性问题作为核心攻关方向，明确钢渣膨胀组分对地聚合物体系稳定性的干扰机制为核心研究重点；同时在 3.2 节研究内容中，围绕钢渣基本性能表征、进场预选指标构建、体积安定性控制规划了系统的研究方案，实现了对钢渣核心痛点问题的全程聚焦； 2.已梳理规范了项目技术路线的全流程逻辑框架，明确了从前期调研、室内试验、机理分析、工程验证到成果输出的闭环研究路径，技术路线图将严格按照项目研究逻辑规范绘制，清晰展示各研究环节的核心内容与衔接关系，可直接指导项目后续实施； 3.已在 7.2 节提交的研究成果及其形式中，将《地聚合物稳定钢渣半刚性基层施工技术指南》补充为项目核心提交成果，同时在 3.2 节研究内容中纳入了施工工艺、质量控制标准等支撑指南编制的相关研究内容，将在项目实施中完成指南的编制工作； 4.已在 3.2 节主要研究内容中补充了相关专项试验研究内容，明确将参照国家现行固体废物浸出毒性相关标准，系统开展混合料的重金属浸出特性试验，将通过试验数据明确材料的环境安全性与污染风险可控性。

4	王松根	1.进一步加强地聚合物稳定钢渣半刚性基层材料的稳定性分析。 2.补充对钢渣材料的基本技术要求和钢渣预处理工艺技术，细化不同配比材料的室内实验方案。 3.进一步补充地聚合物稳定钢渣半刚性基层环保性分析。 4.进一步开展地聚合物稳定钢渣半刚性基层的经济效益分析。	1.已在 3.1 节拟解决的关键问题、3.2 节主要研究内容与 3.3 节关键技术中，强化了材料稳定性分析的相关研究内容，从钢渣体积安定性源头控制、地聚合物胶凝体系适配性优化、钢渣-地聚合物界面协同稳定、多因素耦合下长期性能演化等多个维度，规划了全链条的稳定性研究方案，将在项目实施中形成系统的稳定性分析成果； 2.已在 3.2 节主要研究内容中，补充完善了钢渣材料基本技术要求与预处理工艺技术的相关研究内容，明确了钢渣进场预选的核心技术指标与预处理工艺的研究重点；同时细化了不同钢渣替代比例、不同地聚合物掺量下的混合料室内试验方案，明确了试验核心变量、测试指标与研究路径，可直接指导项目后续室内试验的开展； 3.已在 3.2 节主要研究内容与 7.3 节环境效益分析中，补充完善了材料环保性分析的相关内容，规划了重金属浸出特性、固废消纳、碳减排潜力等多维度的环保性研究内容，将通过系统的室内试验，全面论证材料的环境友好性与长期服役的环境安全性，形成完整的环保性分析成果； 4.已在 7.3 节经济效益分析中完善了相关研究框架，明确将基于全生命周期视角，开展技术从原材料获取、施工到运维的全流程成本核算，与传统水泥稳定碎石基层进行多维度对标分析，量化原材料成本节约、运维成本优化等多重经济价值，最终形成系统的经济效益分析成果。（地聚合物胶凝材料单吨单价虽可能高于水泥，但公路基层混合料中，胶凝材料仅占 5%-10%，占比 90%-95%的骨料才是成本大头；项目通过高掺量钢渣替代天然骨料的带来的成本节约，可以覆盖胶凝材料的小幅溢价，再叠加掺量优化、全生命周期运维成本下降，最终实现综合成本显著低于传统水泥稳定碎石。）
---	-----	---	--

5	吴传海	1.钢渣种类繁多，不同化学物质成份的占比也不同，建议通过研究建立钢渣成分及占比与地聚物适配的负面清单，以便业主放心使用。 2.地聚物稳定钢渣材料的宏观性能研究主要侧重的是传统的强度、模量等力学指标，建议增加其体积稳定性和长期耐久性方面的性能研究。 3.地聚物稳定钢渣材料除了社会效益较好外，其技术经济性相比传统半刚性基层材料也具有较好的优势，建议进一步挖掘。	1.已在 3.2 节主要研究内容中纳入了该专项研究内容，明确将系统分析不同来源、不同成分钢渣的波动规律，建立钢渣化学成分与地聚合物适配性的关联分析方法，划定钢渣禁用、限用的核心指标阈值，形成完善的适配性负面清单，为工程应用端提供明确的选型依据； 2.已在 3.1 节拟解决的关键问题与 3.2 节多尺度性能探究研究内容中，补充完善了相关专项研究内容，明确将系统开展材料干燥收缩、长期浸水膨胀等体积稳定性测试，同时结合西部典型服役环境，开展材料在复杂环境下的耐久性能试验，实现对材料体积稳定性与长期耐久性的全面系统研究； 3.已在 7.3 节经济效益分析中完善了相关研究内容，明确将从原材料成本优化、全生命周期运维成本降低、钢渣固废高值化利用等多个维度，系统挖掘技术的经济优势，与传统水泥稳定碎石基层进行全流程对标分析，明确技术的核心经济价值与应用优势。
---	-----	--	---

大纲评审委员会专家（签字）： 吴传海

项目负责人（签字）： 吴传海