

项目合同编号：25-78K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术

承担单位：长安大学

项目负责人：何锐

通讯邮编、地址：710064 陕西省西安市雁塔区南二环中段

传真、电话：18161809727

起止年限：2026 年 03 月 至 2028 年 03 月

陕西省交通运输厅制

项目合同编号：25-78K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术

承担单位：长安大学

科研合同专用章

项目负责人：何锐

通讯邮编、地址：710064 陕西省西安市雁塔区南二环中段

传真、电话：18161809727

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) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料优化设计与制备工艺研究；
- (2) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料工程性能与微结构特征研究；
- (3) 工业副产石膏基道路基层材料制备关键技术研究；
- (4) 工业副产石膏基道路基层材料耐久性研究；
- (5) 工业副产石膏基固化路基填料制备与性能研究；
- (6) 工业副产石膏基道路基层与固化路基施工控制与效益分析。

2. 技术关键

- (1) 工业副产石膏基胶凝材料物相转化与调控机理研究；
- (2) 工业副产石膏基胶凝材料强度发展与体积稳定的协同控制技术；
- (3) 工业副产石膏基道路基层材料与固化路基填料在道路工程中的施工控制技术。

3. 依托工程（依托工作）

本项目依托 209 省道临蒲界至故市公路改建工程开展成果落地与长期性能观测。209 省道临蒲界至故市公路改建工程是市级重点项目，项目采用 PPP 模式实施，路线全长 17.46km，总投资 3.4 亿元。项目起点位于 209 省道蒲城县和渭南市临渭区交界处韩家村，向南沿旧路设线，经华连村、从蔺店镇东侧设新线绕行通过后，继续沿旧路经北师村、朱家村、故市至终点巴邑村北。

本研究将该工程开展工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料在道路基层与路基中的示范应用研究。通过在施工阶段与运营阶段同步开展性能监测与质量控制，系统评估材料在实际工程条件下的力学性能、体积稳定性与耐久表现，优化施工工艺与配合比设计，提升道路结构整体服役可靠性和使用寿命，为工业副产石膏基道路材料的工程化应用与推广提供可靠技术支撑。同时，本项目也能推动低碳与绿色化建设，降低工程成本，并为类似工程提供参考和示范作用。

二、考核指标

1.预期目标

本项目结合室内试验、理论分析和实体工程对工业副产石膏在道路工程中的高品质协同利用关键技术展开研究，预期达到以下目标：

- (1) 确定工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料的最佳配比和最优制备工艺；
- (2) 探明低碳高早强胶凝材料宏观力学性能和微观结构性能的变化规律；
- (3) 提出工业副产石膏基道路基层材料与固化路基填料在道路工程中资源化利用的关键技术指标及施工工艺。

2.主要技术经济指标

开发出工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料，其 3d 抗压和抗折强度分别达到 20.0MPa 和 2.5MPa 以上。

3.经济和社会效益

(1) 经济效益分析

本研究以工业副产石膏等低成本固体废弃物为主要原料，替代部分传统水泥类材料，显著降低道路基层与路基工程的材料成本和综合造价。通过构建低碳高早强胶凝材料体系，可缩短施工周期、降低养护投入，提高工程周转效率，减少全寿命周期维护费用。同时，研究成果可推动工业副产石膏资源化利用与相关材料产业化发展，带动上下游企业协同创新，形成稳定的经济增长点，具有良好的市场推广前景。

(2) 社会效益分析

本研究成果可有效提升道路基层和路基结构的力学性能与耐久性，增强道路工程整体安全性与服役可靠性，为区域交通基础设施稳定运行提供技术支撑。通过促进工业副产石膏的大规模、高附加值利用，有助于缓解固废堆存压力，改善区域生产生活环境。研究成果在公路工程中的推广应用，可提升工程建设与养护的技术水平，对推动交通基础设施高质量发展和区域协调发展具有积极社会意义。

4.成果提供形式

(1) 开发出工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料，其 3d 抗压和抗折强度分别达到 20.0MPa 和 2.5MPa 以上；

(2) 建设示范性工程 1 处；

(3) 发表相关论文 2 篇；

(4) 申请专利 1 项；

(5) 编写施工技术指南 1 部；

(6) 提交课题研究报告 1 部。

5. 其他考核指标

开展媒体宣传报道 3 次，技术交流 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026.03~2026.05	开展项目启动与总体技术路线细化，系统收集脱硫石膏、磷石膏等工业副产石膏原料，完成化学组成、矿物组成及基本性能测试；同步调研典型道路工程应用需求，明确试验体系与示范工程方案，完善研究计划与实施安排；完成项目总体布局与研究基础条件建设。
2026.06~2026.11	围绕工业副产石膏活性提升与多组分协同调控，开展低碳高早强胶凝材料组成设计与水化机理研究，系统分析配比变化对早期强度与水化行为的影响，形成性能稳定的材料体系，提出工业副产石膏基胶凝材料基本配方；发表学术论文 1 篇。
2026.12~2027.05	在前期研究基础上，优化胶凝材料制备工艺与施工参数，开展道路基层与固化路基材料中试及工程适应性研究，通过现场试验验证施工性能、强度发展与体积稳定性，形成具备工程可实施性的配制与施工技术体系；申请专利 1 项。
2027.06~2027.11	依托示范工程开展工业副产石膏基道路基层与固化路基材料应用示范，实施全过程施工质量控制，系统监测服役性能与耐久性，评估力学性能演化及环境、经济效益；建成示范工程 1 处，发表学术论文 1 篇。
2027.12~2028.03	对示范工程长期监测数据进行系统整理与综合分析，总结材料性能与工程应用规律，凝练可推广的技术路线和应用建议，完成研究报告、成果汇编与结题验收材料，编写施工技术指南，形成完整成果体系并支撑项目顺利验收。

四、项目经费

项目总经费：40.00 万元

交通运输厅补助：19.99 万元

自筹资金：20.01 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	35.00	17.76
1. 设备费	0.00	0.00
(1) 购置设备费	0.00	0.00
(2) 试制设备费	0.00	0.00
(3) 设备改造与租赁费	0.00	0.00
2. 业务费	30.00	15.26
(4) 材料支出	10.00	6.00
(5) 测试化验实验加工支出	13.00	6.26
(6) 燃料及动力支出	0.00	0.00
(7) 差旅支出	2.00	0.50
(8) 会议支出	1.00	0.50
(9) 国际合作与交流支出	0.00	0.00
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	3.00	1.50
(11) 其他支出	1.00	0.50
3. 劳务费	5.00	2.50
(12) 劳务性支出	4.00	2.00
(13) 咨询专家支出	1.00	0.50
(二) 间接费用	5.00	2.23
4. 管理费	5.00	2.23
5. 绩效支出	0.00	0.00
合 计	40.00	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	0
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	0
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	2
		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	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2.获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	2
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	1
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	是
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	2
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	10
		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）	0
		2. 科研仪器设备利用率（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	1
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	100
		2. 新增销售（万元）	100
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	10
	社会效益	1. 新增税收（万元）	5
		2. 新增就业人数	20
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	20
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	1
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	0
		10. 环保效益	0
其他需要说明的情况	无		

六、承担单位或研究人员分工

(1) 长安大学

负责制定研究大纲和总体研究方案；负责编写立项申请书和可行性研究报告；负责工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料的物相转化规律、水化过程及性能形成机理研究；负责胶凝材料体系组成设计、配合比优化及制备工艺参数确定；负责研究报告的撰写工作；完成项目鉴定和验收工作。

(2) 渭南市交通运输局

参与制定总体研究方案；参与示范性工程建设；协调示范性工程建设；组织现场项目施工及自筹经费。

(3) 渭南交通投资有限公司与渭南国控环保科技有限公司

示范性工程相关设计。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学						
参与单位（排序）：渭南市公安局、渭南交通运输局、渭南交通投资有限公司、渭南国控环保科技有限公司						
项目负责人						
序号	姓名	出生年月	工作单位	职称/职务	专业	在项目中担任具体工作
1	何锐	1984.05	长安大学	正高级	道理论工程	项目总负责
主要研究人员						
2	郭建	1982.12	渭南市公安局	副高级	道路工程	项目统筹管理
3	原朝林	1984.07	渭南市公安局	副高级	桥梁工程	现场技术负责及试验应用
4	郑少华	1986.12	渭南交通投资有限公司	中级	道路工程	依托工程规划
5	王振军	1978.12	长安大学	正高级	道路工程	系统架构设计
6	孙立龙	1989.05	渭南交通投资有限公司	中级	道路工程	依托工程性能观测
7	齐琳	1981.10	长安大学	副高级	道路工程	复合胶凝体系设计
8	赵林渭	1986.09	渭南国控环保科技有限公司	中级	道路工程	现场试验与性能评价

9	张煜博	1999.06	渭南市公安局	助理级	桥梁工程	现场试验与性能评价	张煜博
10	郭豪彦	1993.03	长安大学	中级	道路工程	微结构优化调控	郭豪彦
11	迟兵	1985.05	渭南国控环保科技有限公司	中级	道路工程	现场施工质量控制	迟兵
12	孙仕伟	1990.12	长安大学	中级	道路工程	室内试验研究	孙仕伟
13	魏智毅	2001.03	长安大学	无	道路工程	材料性能评价	魏智毅

八、信息表

项目合同编号		25-78K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称		硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术										
项目实施所在地		陕西省西安市			起止年限		2026 年 01 月至 2027 年 12 月					
总 经 费		40.00 万元			厅 拨		19.99 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						代码	610100			
	通讯地址	陕西省西安市雁塔区二环南路中段						邮编	710064			
	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	渭南市交通运输局										
	2	渭南交通投资有限公司										
	3	渭南国控环保科技有限公司										
项目负责人		姓 名	何锐		性 别 (1) 1.男 2.女			出生年份	1984			
		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	18161809727 029-82337340			电子邮箱		rhe@chd.edu.cn				
项目联系人		姓 名	何锐			性 别		男				
		联系电话	18161809727 029-82337340			电子邮箱		rhe@chd.edu.cn				
项目组人数		13	高级	5	中级	6	初级	0	其他	2		
主要研究内容 (100 字以内)		本研究以工业副产石膏为原料,开展低碳高早强胶凝材料设计与制备研究,系统评价其工程性能与耐久性,研发道路基层与固化路基材料关键技术,并通过施工控制与效益分析,形成可推广应用的道路工程技术体系。										
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、C、D	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.合同正本一式拾份，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)

2020年3月27日

联系人：(签字)

(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)

2020年3月27日

项目负责人：(签字)

(公章)

电 话：18161809727

财务负责人：(签字)

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：（签字）

年 月 日

项目编号: 25-78K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开
发与应用关键技术

申请单位: 长安大学

渭南市交通运输局

渭南交通投资有限公司

渭南国控环保科技有限公司

联系人: 何锐

电 话: 18161809727

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 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 项目概括	3
1.4 市场需求前景	4
1.5 达到的技术水平及在国民经济发展中的作用	4
二、 前期科研及工作基础	5
2.1 研究现状	5
2.1.1 国内外研究现状	5
2.1.2 研究现状总结与查新分析	10
2.2 项目前期科研及现有工作条件	11
2.2.1 现有支撑条件	11
2.2.2 工作基础	11
2.2.3 现有试验手段	12
2.2.4 研究人员情况及协作条件	12
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	16
3.3 技术路线	18
3.3.1 研究技术方案	18
3.3.2 工作流程	20
3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接	21
3.5 有关技术经济指标	21
四、 项目承担单位及参加单位概况	21
4.1 单位概况	21
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	24
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（工作）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	26
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
8.1 项目预期目标	31
8.2 提交的研究成果及其形式	31
8.3 经济、社会、环境效益分析	31
九、 其它需要说明的问题	32
十、 申请单位意见	33

一、项目研究的背景和必要性

1.1 研究背景

我国当前正处于交通基础设施建设与存量道路设施升级并行的重要阶段，道路工程建设持续推进，对基层与路基材料的早期强度、施工效率及长期服役性能提出了更加严苛的要求。然而，传统水泥基道路材料在生产过程中能耗高、碳排放量大，且在服役期易出现早期收缩开裂、抗冻性能不足、路用性能衰减快等问题，已难以完全满足新时期工程建设对绿色低碳、高性能道路材料的迫切需求。

硫酸钙固废是工业生产过程中因化学反应生成工业副产石膏的主要成分，也称化学石膏或工业废石膏，其主要成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ，含量在 70% (w) 以上。按生产工艺来源主要分为脱硫石膏、磷石膏、氟石膏、柠檬酸石膏、铅石膏和钛石膏等，其中磷石膏和脱硫石膏产量最大。这些工业副产石膏的共性是二水硫酸钙含量一般在 70% 以上；颗粒较细，粒径分布范围窄，级配不均；晶体生长较差，杂质成分复杂且各有特点。脱硫石膏产生于火电厂燃煤燃烧后尾气脱硫过程，含有少量硫化物、亚硫酸钙等不稳定易分解组分，一般情况下呈碱性。磷石膏是湿法磷酸生产过程中产生的固体废弃物，含有磷、氟等污染因子，呈酸性，pH 值为 1.5~4.5。

近年来，随着我国火电、磷肥、钛白粉及其他相关行业的发展，工业副产石膏的排放及堆放量与日俱增。国家统计局发布的统计数据显示，目前我国工业副产石膏累积堆存量近 10 亿吨。其中，烟气脱硫石膏 5 亿吨以上，磷石膏 2 亿吨以上。工业副产石膏的堆存导致大量土地被占用，对河流、大气、土壤等环境造成了严重的污染，亟待寻找一种高附加值资源化利用工业副产石膏的有效途径。2021 年 3 月，国家发改委发布了《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》，意见中指出，在“十四五”期间要支持利用工业副产石膏制备绿色建材等新产品新材料，扩大工业副产石膏高值化利用规模。继续推广脱硫石膏、磷石膏等在生产水泥和新型建筑材料等领域的利用，在确保环境安全的前提下，探索在土壤改良、井下充填、路基材料等领域的应用。通常情况下，石膏基胶凝材料的碳排放量显著低于水泥、石灰等胶凝材料，是真正意义上的绿色、低碳材料。因此，规模化、高值化、资源化利用工业副产石膏，是国家“绿水青山”发展战略的需要，也是国家“碳达峰、碳中和”发展战略的需要。

渭南境内资源丰富，是我国十大煤炭产地之一，全市已探明的矿产资源保有储量潜在经济价值达 2989 亿元，居全省第 3 位，尤其是磷矿资源居全省首位。2023 年，渭南市脱硫石膏固废产量为 62 万吨，综合利用量为 11 万吨，利用率仅为 17.74%；磷石膏固废产生量为 105.69 万吨，综合利用量为 20.99 万吨，利用率仅为 19.86%。目前工业副产石膏固废堆积问题非常严重，若经过风化、雨淋等物理化学作用渗透至地下，将对周边环境及地下水造成严重污染。陕西省人民政府发布的《中共陕西省委关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》提出：发展企业引领支撑作用，聚焦系统节能、水气土环境污染治理、尾矿资源化及工业废渣利用等重点领域，加强关键节能环保技术装备产品的研发攻关和产业化。立足产业升级和做大做强，推动石油（煤炭）化工、冶金钢铁、建筑建材、纺织服装等传统产业向高端化、智能化、绿色化发展。因此，加快工业副产石膏的综合利用对于推动渭南地区的经济转型和社会发展具有重要意义。

然而目前工业副产石膏活性低、杂质多、成分波动大，直接用于工程材料存在水化反应缓慢、早期强度不足、体积稳定性差等技术瓶颈，制约了其在道路工程领域的高效利用。在道路基层与路基工程中，施工周期紧、交通导改条件复杂、工期要求高，基层材料早期强度不足将严重影响施工进度与结构安全。同时，基层材料长期处于车辆荷载和环境循环作用下，其抗疲劳、收缩变形等能力直接决定道路结构的耐久性与服役寿命。目前传统基层材料在寒冷地区易冻胀破坏，在干旱地区易产生干缩裂缝，在重载交通条件下疲劳损伤累积快，成为道路早期病害的重要诱因。

1.2 研究目的

将工业副产石膏等固废高效协同利用，通过活化技术与配比优化制备低碳高早强胶凝材料，并构建其在道路基层与路基填料中的应用体系，是实现固废减量化利用与道路工程性能提升的关键技术方向。工信部与交通运输部近年来多项政策均强调推进固废资源化道路材料技术创新，构建绿色低碳交通基础设施体系，这为工业副产石膏基道路材料技术研究提供了明确的政策需求与发展空间。

目前，该类材料在水化机理、活性提升路径、工程应用适应性与耐久性保障方面仍缺乏系统研究，配合比设计缺乏理论支撑，施工控制技术体系尚未建立，

限制了其规模化推广应用。特别是在复杂道路环境下，材料强度发展规律、体积变形控制指标与环境作用适应性尚不清晰，亟需通过基础研究与工程验证形成成套技术体系。

基于此，本项目围绕工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料在道路工程中的应用需求，从原料活化与配比设计、材料性能与微结构演化规律、基层与路基材料制备关键技术、耐久性保障体系以及施工控制与效益评价等方面开展系统研究，形成固废资源化、高性能材料和工程应用全链条技术体系，实现工业副产石膏的高效利用与道路工程性能提升协同发展，为构建绿色低碳交通基础设施提供技术支撑。

1.3 项目概括

随着“双碳”战略的深入实施和交通基础设施绿色低碳转型需求的不断提升，道路工程领域对低环境负荷、高性能建筑材料的需求日益迫切。与此同时，脱硫石膏、磷石膏等工业副产石膏产量持续增长，长期堆存不仅占用大量土地资源，还可能引发次生环境污染，已成为制约区域生态安全与工业可持续发展的突出问题。如何实现工业副产石膏的规模化、高值化利用，并将其有效转化为性能可靠、环境友好的道路工程材料，是当前交通工程与固废资源化领域亟需解决的关键技术难题。

在此背景下，硫酸钙固废基低碳高早强胶凝材料因其碳排放低、早期强度发展快、原料来源广泛等优势，展现出良好的工程应用潜力。然而，受原料来源复杂、矿物组成差异大及水化反应机理不清等因素影响，现有工业副产石膏基胶凝材料在配比设计、性能稳定性、体积变形控制及耐久性保障等方面仍存在明显不足，制约了其在道路基层和路基工程中的推广应用。因此，有必要系统开展工业副产石膏基低环境负荷道路材料的基础理论与工程应用关键技术攻关。

基于此，本项目以脱硫石膏、磷石膏等硫酸钙固废为核心原料，围绕低碳高早强胶凝材料的组成优化、制备工艺、工程性能及耐久性等关键问题，系统开展硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术研究。通过深入分析工业副产石膏的化学组成、矿物结构及其物相转化规律，揭示不同组分协同作用下的水化反应机制与微结构演化特征，构建胶凝材料组成—水化动力学—宏观性能之间的内在联系。在此基础上，开发性能稳定的工业副产石膏基低碳高早强胶凝材

料，并将其应用于道路基层材料和固化路基填料的制备，系统评价其力学性能、体积稳定性和耐久性能，提出适用于道路工程的配合比设计方法与施工控制技术。

1.4 市场需求前景

在“双碳”目标和交通基础设施绿色转型的背景下，工业固废资源化利用已上升为国家战略重点。《关于“十四五”推进大宗固体废弃物综合利用的指导意见》等政策文件明确提出，要大力推动工业副产石膏在基础设施领域的高值化利用。在政策持续加码与工业副产石膏产量长期高位运行的双重驱动下，开发低碳、低环境负荷的硫酸钙固废基道路材料，既是解决固废堆存与环境风险问题的现实需要，也是落实国家绿色发展战略的重要技术路径。

从市场需求看，随着国省干线公路、农村公路及交通基础设施补短板工程持续推进，道路基层与路基工程对早强、施工适应性强、成本可控的新型胶凝材料需求不断增长。传统水泥基材料在高碳排放、资源消耗大及部分服役环境适应性方面的局限性日益凸显，而工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料在早期强度发展、施工周期缩短、固废协同利用等方面具有显著优势，在道路基层材料和固化路基填料领域具备广阔的替代和增量应用空间。依托本项目形成的材料设计方法、工程应用技术和施工控制体系，相关成果有望在中西部地区、资源型城市及交通建设需求集中的区域实现规模化推广，推动形成“固废资源化利用—低碳道路材料—工程应用”的协同发展模式，市场前景和产业化潜力显著。

1.5 达到的技术水平及在国民经济发展中的作用

本项目突破了工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料的配比优化、制备工艺控制、性能调控及耐久性保障等关键技术，形成了涵盖材料设计、微结构调控、工程应用和施工控制的完整技术体系，所有性能指标满足现行道路基层与固化路基材料标准。项目成果显著提升了道路基层和固化路基材料的早期强度、体积稳定性及耐久性能，实现了工业固废资源化利用和道路工程低碳化的协同目标，直接服务国家“双碳”战略、交通基础设施绿色转型及西部大开发等重大国家战略需求。通过优化施工工艺、智能化养护管理及材料低碳设计，项目有效降低了道路工程碳排放和施工成本，带动了固废资源化、绿色建材及道路施工装备等上下游产业链发展，为我国道路工程向低碳化、高性能和可持续方向发展提供了重要技

术支撑,在保障交通基础设施安全运行和区域交通可持续发展方面发挥了显著战略作用

二、前期科研及工作基础

2.1 研究现状

2.1.1 国内外研究现状

2.1.1.1 脱硫石膏的工程特性

脱硫石膏是电厂和冶炼厂等为除去燃煤生成的 SO_2 使用湿法脱硫技术所产生的工业副产品,主要成分为二水硫酸钙 ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)。我国脱硫石膏纯度在 75%~90%,部分地区纯度可超过 90%。脱硫石膏内还含有少量的半水硫酸钙、 CaCO_3 和 SiO_2 等。其外观呈现白色或淡黄色,粒径分布为 30-50 μm 。脱硫石膏成分和性质与天然石膏类似,且脱硫石膏纯度更高,粒径相对较小,需水量更高。由于各地区煤炭原料和脱硫工艺差别大,导致脱硫石膏内微量杂质成分和含量不一,使脱硫石膏原料成分复杂,综合利用率不高。

2.1.1.2 脱硫石膏在道路工程中的应用

目前脱硫石膏主要应用于建筑材料、农业和化工合成等领域,其中建筑材料领域主要有以下应用:

(1) 水泥添加剂

M. Hulusi Ozkul^[1]发现掺入脱硫石膏后,会延长水泥的凝结时间,但会降低水泥的力学性能;Chen Chandara^[2]研究发现废石膏可以代替天然石膏应用于水泥缓凝剂;顾雪慈等^[3]研究发现:相同的粉磨时间,加入脱硫石膏不仅延长水泥的凝结时间,而且增加水泥的比表面积,改善力学性能。曹素改等^[4]研究表明,在脱硫石膏中复掺粉煤灰进行改性,得到其最优掺量用于水泥生产中,制备出低成本、高性能的水泥产品;另外,尤彩霞等^[5]利用脱硫石膏将亚硫酸钙(CaSO_3)催化氧化以及重结晶的方法,得到的二水石膏用于水泥缓凝剂,其晶形良好、颗粒粒径较粗且均匀。

(2) 道路材料

王盛铭等^[6]发现当脱硫石膏-粉煤灰掺量为 20%~30%时,制备的道路混凝土不仅力学施工性能良好,而且脱硫石膏与粉煤灰的共同作用使道路混凝土具有优

异的抗裂性；孙家瑛等^[7]研究表明脱硫石膏代替部分粉煤灰，改善了改性三渣混合料的力学性能，并且耐高温、耐水、抗冻性以及抗腐蚀性等均优于普通三渣混合料（粉煤灰、石灰、石渣）；Antonio Telesca 等^[8]将 40%天然或脱硫石膏与 60%矿物掺合料掺配制备出性能良好的预制建筑构件；陆青清等^[9]将一定掺量的脱硫石膏掺入水泥稳定碎石中，得出以下结论：确定脱硫石膏对水泥稳定碎石的物理力学性能的影响规律，水泥：脱硫石膏：矿渣的配合比为 1.5：1.5：5，并且石膏的掺量不应超过 6%；周海龙等^[10]发现粉煤灰与脱硫石膏结合，与水泥掺配形成一种新型复合水泥土，其性能优于普通水泥土；Yong Li 等^[11]利用 RM-FA-DG 复合材料制备道路基层材料，研究表明当摩尔比 $(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)=0.88$ 时，7d 无侧限抗压强度最高；同时生成的水化产物促进材料强度及耐久性的发展，并且 RM-FA-DG 体系有效地强化了重金属离子。

（3）石膏制品

王小亮等^[12]以脱硫石膏为原料，通过前期试验得到膨胀珍珠岩、玻璃纤维及防水剂的最优掺量，从而获得质量轻且强度高的新型石膏砌块。王永生等^[13]向脱硫石膏中加入改性淀粉制备纸质石膏板能够提高其粘结性能。在此基础上，张翔^[14]采用稠浆多泡技术以及掺加饱和石灰水，对石膏板的强度起到促进作用，改善其粘结性能以及耐水性。张帅等^[15]通过脱硫石膏制备轻质抹灰石膏，利用外加剂应用于底层、面层以及内墙等方面，效果显著。

脱硫石膏实际应用具有以下效益：①可使生产成本降低，具有客观的经济效益；②可使固体废弃物绿色资源化利用，以实现生态环境的保护，符合国家环保要求。

2.1.1.3 磷石膏的工程特性

磷石膏是湿法制磷酸过程中产生的工业副产物，也是我国最大宗的工业副产石膏之一，平均每生产 1 吨磷酸会产生 4.5~5.5 吨的磷石膏。磷石膏中的主要成分为二水硫酸钙（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ），含量约占 70%~90%，还含有少量的磷、氟、有机物、氧化物以及少量重金属和放射性物质等杂质。据中国磷复肥工业协会数据显示，当前我国磷石膏的堆存量约为 10 亿吨，而综合利用率只有约 40%。2016 年之后，我国磷石膏每年的产生量基本维持在 7500~7800 万吨，利用率呈逐年上升的态势。虽然磷石膏的利用量呈逐步上升的态势，但依然存在大量未利用的磷

石膏被作为固体废弃物进行堆存,磷石膏的堆存不仅占用了大量土地,对环 境安全也带来了一定的风险,同时影响了磷化工企业及行业的可持续发展。

2.1.1.4 磷石膏在道路工程中的应用

近年来,我国道路建设发展迅速,将磷石膏应用于道路工程不仅能提高道路使用品质,而且可以降低工程造价,解决环境污染问题^[16]。随着道路建设的发展,磷石膏在道路工程中有越来越多的应用^[17],现阶段主要在以下两个方面,一方面 是用作路基填料,另一方面是用作路面基层材料。

(1) 磷石膏在道路填料中的研究与应用

将磷石膏用作路基填料,国内外均做过一些试验,取得了一定的进展。在国外有多名学者对磷石膏的路用性能进行研究,将磷石膏作为筑路材料的研究在美国广为开展,美国迈阿密大学和佛罗里达大学在研究中发现,在磷石膏中加入一定量的粘性土砂,制成的混合料是路用性能优异的路基填充材料^[18,19]。Tebogo 等人^[20]用预处理过的磷石膏结合石灰、粉煤灰,做成复合材料符合南非道路规范要求,并满足基层强度耐久性的标准。Stanislaw 等人^[21]以废弃物磷石膏和粉煤灰制成的复合材料实际应用在停车场建设中,停车场运营一年半后的强度试验结果确认了可行性。Mustapha 等人^[22]使用原状磷石膏作为路堤材料进行可行性研究,研究了粘土、粉煤灰、石灰、钙质材料等稳定剂的作用,将强度提高到有利于试验的临界值,表明稳定混合料可用作路堤材料。焦延滨^[23]、董满生等^[24]研究认为在一定的施工工艺下,磷石膏不仅是一种品质优良的路基填料,而且是一种性能优良的路面基层材料,并可不同程度地改善半刚性基层的工程性能。唐庆黔等^[25]通过室内外试验,研究了磷石膏在路基路面工程中的可行性和力学性能。在试验路堤施工中发现,磷石膏对水敏感,未碾压的磷石膏在遇到雨水饱和后呈现出类似弹簧土的特性,难以压实。因此,在施工过程中需要严格控制含水率。

李章锋等^[26,27]通过对不同配合比磷石膏改良土进行击实、加州承载比

(CBR)、无侧限抗压强度和干湿循环试验后,研究认为:纯磷石膏具有较强的亲水性,水稳定性较差,压实后会吸收水分而变软,导致强度降低并引起路基的变形,不适宜作为路基填料。经固化剂改良后的磷石膏稳定土水稳定性良好,其 CBR 值和无侧限抗压强度均满足且超过公路路基填料的设计要求,可以作为路

基填料。陶松^[28]研究表明,单一的磷石膏不适宜作为道路填料,由于磷石膏的亲水性较强,水稳性较差,因此在雨季或者地下水位较高的地区,仅用磷石膏作为道路填料会导致路基或底基层出现变形和下沉的现象,强度下降。添加适量稳定剂能使磷石膏-粉煤灰体系结合料的水稳性得到极大提高,并且只要稳定剂的掺量在适当范围内,对试件膨胀量的影响可以忽略不计,并验证了该材料作为道路填料的可行性。克高果等^[29]以磷石膏废料为路基填料,采用煅烧法改性磷石膏,通过室内试验和试验路,研究了煅烧改性磷石膏废料的路用性能。发现添加7%~9%的煅烧磷石膏可以明显提高其路用性能,其 CBR 值、无侧限抗压强度、干湿循环强度特性、水稳定性和自由膨胀率等指标均满足路基填料的要求。孟维正等^[30]研究表明:纯磷石膏水稳定性较差,但磷石膏通过与水泥、石灰的水化凝结过程会改善其水稳性。并且发现经改良后的磷石膏体系的无侧限抗压强度与参加的水泥、石膏质量成正相关关系。

(2) 磷石膏在道路基层中的研究与应用

磷石膏不仅是一种品质优良的路基填料,而且是一种性能优良的路面基层材料^[23,31],在用作道路基层材料的研究中也取得了不少成果。

沈卫国等^[32,33]制备了一种粉煤灰磷石膏路面基层材料,该材料较普通二灰类材料的早期强度有显著提高,并对其强度影响因素及强度形成机理进行了深入探讨。研究表明磷石膏的加入大幅度改善了二灰类路面基层材料的强度性能,磷石膏可以增强结构的整体性,降低基层材料的收缩,提高抗裂性能,是一种优良的筑路添加料。周明凯等^[34]研究了水泥磷石膏稳定碎石强度的影响因素,认为水泥磷石膏稳定碎石,力学性能优异,抗裂性能良好,整体性能优异,当磷石膏掺量 8%时材料强度达到峰值。董满生等^[35]通过室内外试验得出,在一定施工工艺下,适量磷石膏对二灰基层的强度(特别是早期强度)有提高作用,是一种性能优良的基层材料,磷石膏在水泥和矿粉等活性材作用下,水化产物钙矾石的生成使路面基层形成一定的强度。吴开权等^[36]经过室内试验和道路工程上的铺筑试验表明,将磷石膏运用于改性二灰碎石基层材料的性能明显优于普通二灰碎石混合料,经磷石膏改性的混合料不仅减少了反射裂缝,还能更早地开放交通,降低工程造价。

Shen 等^[37-39]利用磷石膏、石灰、钢渣和粉煤灰制备的路面基层材料在工程

应用方面具有优良的性能,研究发现,磷石膏可提高二灰土和石灰土的早期强度,并增强结构的整体性,降低基层材料的收缩并提高抗裂性能,满足基层性能要求,是一种性能优异的筑路材料。张英富等^[40]通过室内试验发现,对磷石膏、粉煤灰和石灰混合料比例进行优化后形成的结合料可满足不同等级公路的基层和底基层的强度要求,此外,还分析了结合料强度形成机理。瓦浩^[41]试验研究表明,合理设计粉煤灰、磷渣、磷石膏等工业废渣的配合比,可配制出性能满足要求的路面基层材料,并可替代传统的水泥稳定土、二灰稳定土用于铺筑路面基层。

Zhao 等人^[42]研究了熟料-钢渣-粉煤灰-磷石膏道路基层复合胶凝材料,研究发现磷石膏可用于缓凝微膨胀道路基层混合料,相对较高的磷石膏含量有利于激发粉煤灰的火山灰活性,并通过抑制钙矾石(Aft)向单硫型水化硫铝酸钙(AFm)的转换更有效地补偿收缩后期水化阶段,调节了膨胀率。过量的磷石膏会造成复合胶凝材料的膨胀系数过大,导致结构破坏。但是适量的钢渣取代粉煤灰可促进复合胶凝材料的早期水化、优化孔结构,并显著提高道路基层复合胶凝材料的性能。丁红慧等^[43]研究了磷石膏在二灰稳定粒料中的作用,发现适量的磷石膏可提高二灰稳定粒料的强度、水稳性能和抗冲刷性能。

Zhou 等人^[44]对影响磷石膏水泥稳定砂砾强度性能的因素进行了系统的探讨,并对该基层材料的回弹模量、劈裂强度和抗裂性进行了研究。结果表明,磷石膏掺量、水泥掺量以及骨料级配对磷石膏水泥稳定碎石的强度性能有重要影响,相较于水泥稳定碎石,水泥稳定磷石膏碎石基层材料的各项力学性能指标较好,具有优异的抗裂性能,适用于作为道路基层材料。Ngo 等人^[45]研究结果表明,磷石膏与粉煤灰掺合物通过水泥和石灰进行稳定,试样的无侧限抗压强度、弹性模量、CBR 等物理力学性能即使在磷石膏含量达到 90%时也能满足道路施工路基、底基层或基层的要求。Wang 等人^[46]研究得出预埋填料的最佳配比为: 65% 原状磷石膏、20%粉煤灰、6%脱硫灰、6%生石灰、3%硅灰和适量水。常温改性磷石膏预埋填料性能良好,具有良好的应用前景。

(3) 磷石膏路用材料体积稳定性研究现状

刘开琼等^[47]通过实验研究磷石膏混合料水敏感性较强,经复合改性剂处理过的磷石膏混合料,在不遇水情况下具有微膨胀性,有利于混合料密实和抵抗收缩变形。但在含水状态下,混合料吸水膨胀量较大,容易导致混合料开裂。徐泽

友等^[48]研究表明混合料的膨胀性随磷石膏含量的增加而增加,浸水 16 天后膨胀可稳定。混合料具有较低的膨胀性,可满足路基填筑条件。徐雪源^[49]通过干缩试验和膨胀试验发现磷石膏自身具有膨胀性和增密性,运用在路面基层结构中能够产生微膨胀,补偿大部分温度与湿度收缩,可以有效防止基层开裂。董满生等^[25,35]发现磷石膏的膨胀性一方面可显著减小半刚性基层收缩,减弱或避免半刚性基层开裂;另一面若膨胀量过大会破坏火山灰反应产物之间联结,导致后期强度下降。研究表明磷石膏膨胀量很小,水稳性好,强度满足要求,可以作为路基填料。

赵艳等^[50]研究发现二灰混合料中加入磷石膏,可以有效提高二灰混合料的早期强度,并改善基层的路用性能。但是磷石膏含量过大,会造成混合料膨胀过大,强度降低甚至丧失。试验表明:不恰当的磷石膏配合比,是造成磷石膏底基层材料遇水膨胀量增大、强度丧失的主要原因。丁建文等^[51]认为将磷石膏取代二灰土中的粉煤灰,大剂量应用于道路底基层稳定土,在富水环境下引发的吸水膨胀现象,从而导致工程病害。赵德强等^[52]研究了熟料-钢渣-粉煤灰-磷石膏体系道路基层复合胶凝材料的凝结时间、胶砂强度和膨胀性能,发现道路基层复合胶凝材料的凝结时间和膨胀率随磷石膏掺量的增加而增加,过量磷石膏会造成过大的膨胀,破坏硬化浆体结构。

2.1.2 研究现状总结与查新分析

(1) 目前将工业副产石膏作为胶凝材料的研究取得了较多成果,但大多数研究是将工业副产石膏作为添加料与水泥、矿渣、粉煤灰等混合后用于稳定集料,且掺量较低。对于不掺水泥且以工业副产石膏为主要原料制备胶凝材料的研究较少,导致工业副产石膏未能得到充分利用。同时工业副产石膏基胶凝材料的基本性能与材料配比、预处理方式及制备工艺等因素紧密相关,目前关于此方面的研究处于空白状态。

(2) 工业副产石膏基道路材料存在的耐水性差和体积稳定性差等问题不可忽视。工业副产石膏之一的磷石膏在含水量较高的情况下会变软导致强度降低,同时在湿润环境中易膨胀开裂,在干燥环境下时易收缩开裂,均会导致路面破坏,严重制约了工业副产石膏在道路基层与固化路基填料等领域的大规模应用。因此,通过探明工业副产石膏物相转化与生长机制,开发出具有优异力学性能与体

积稳定性的胶凝材料具有重要意义。

2.2 项目前期科研及现有工作条件

2.2.1 现有支撑条件

该项目由长安大学牵头，渭南市交通运输局、渭南交通投资有限公司和渭南国控环保科技有限公司联合参与，各单位已建立了稳定的合作基础，并且均有专业的科研技术人员和成熟的养护工作经验，在公路交通科研领域取得了多项研究成果。尤其是在工业固废高效转化利用方面，积累了丰富的实践经验。

项目申请团队长期从事道路材料的设计与开发研究工作，先后入选交通部重点领域创新团队“特殊地区公路建设与养护材料创新团队”和陕西高校青年创新团队“严酷环境下长寿命混凝土创新团队”。近年来已主持（参加）包括十三五重点研发计划、国家自然科学基金项目、陕西省科技厅国际合作重点项目、陕西省交通科技项目在内的各类项目 40 余项，获省部级科技奖励 10 余项。在现代物相表征技术、有机无机复合改性技术、材料合成制备与检测技术很熟悉，能够熟练解读各种图谱，能深入剖析材料之间的相互作用本质。本项目已具有良好的前期工作基础，研究内容丰富、目标明确、研究手段科学、课题组成员年龄结构、专业背景和知识体系交叉互补，具备完成本项目的能力和基础，有望完成本项目的研究内容，实现本项目的研究目标，提高交通基础设施精细化建设和养护水平。并且，技术负责人所在课题组前期研究中已做了成功尝试，先后主持了陕西省重点研发计划项目“装配式建筑高强大流态无收缩灌浆料制备与应用关键技术（2022GY-422）”、陕西省交通科技项目“混凝土桥梁伸缩缝快速维修关键技术研究与应用（20-22K）”、“公路交通标线质量控制及耐久性提升关键技术研究（19-21K）”，为本项目的开展打下了良好的基础，所提研究方案切实可行。

2.2.2 工作基础

本项目研究团队长期致力于工业固废高效转化利用与绿色低碳交通建筑方面的工作，在工业固废转化与调控机制、施工质量控制方面积累了丰富的理论基础和实践经验。项目技术负责人主要从事道路材料的制备与评价研究工作，近年来已主持（参加）包括国家自然科学基金面上项目、十三五国家重点研发计划子课题、陕西省创新人才支撑计划、陕西省科技厅重点研发计划项目和国际合作重点项目

在内的各类项目 30 余项。对环保型路面材料研发、有机无机复合改性技术、材料合成制备与检测技术很熟悉，本课题组在前期资料调查已做了大量工作，具备课题分析理论基础和试验设备，完全可满足本课题室内外研究工作的需要。

本团队依托长安大学交通运输工程重点优势学科平台，紧密围绕国民经济发展导向和行业技术进步的需求，积极开展交通铺面领域国家重点项目研发和重大工程的基础理论与科技转化服务工作，有力促进了我国交通行业的知识更新、技术进步和人才培养。

2.2.3 现有试验手段

本团队依托长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室、道路结构与材料交通行业重点实验室等重点平台开展项目研究。研究团队和依托实验室装备有一批国内一流水平的实验设施和检测系统，包括道路加速加载试验系统（HVS）、工业 CT-材料试验断层扫描装置，拥有多功能材料试验系统、MTS 电液伺服万能试验机、孔结构测试仪、SANS 电子万能试验机、电子探针仪、显微硬度仪、激光粒度仪、动态力学分析仪、流变仪、原子力显微镜、凝胶渗透色谱仪、元素分析仪、场发射扫描电子显微镜、X 射线衍射分析、纳米压痕仪、动态热机械分析仪、红外光谱分析仪、计算机工作站、高性能计算平台等一大批现代微观分析与计算模拟设备，可保证本项目的宏、微观试验和软件开发顺利开展。

2.2.4 研究人员情况及协作条件

本项目的各项研究内容和研究计划已落实到每个分项负责人，将严格按本项目计划目标组织实施。每月定期召开项目工作会议，检查前阶段的具体工作、研究进展和实施深度，讨论解决研究过程中的各项技术问题和其他事宜，布置后阶段的工作重点和具体要求。对不能按时、保质完成研究任务的人员及时予以更换。对本项目的重点阶段性目标和成果进行重点考核和督促，以确保项目总体研究目标的实现。

2.3 参考文献

- [1] M Hulusi Ozkul. Utilization of citro- and desulphogypsum as set retarders in Portland cement[J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30(11):1755-1758.
- [2] Chea Chandara. Use of waste gypsum to replace natural gypsum as set retarders in Portland cement[J]. Waste Management, 2008, 29(5):1675-1679.

- [3] 顾雪慈, 赵虎奎, 练礼财, 等. 脱硫石膏代替天然石膏作水泥缓凝剂[J]. 水泥, 2006, (12):32-35.
- [4] 曹素改, 魏卫东, 韩屹勃, 等. 电厂脱硫石膏制备水泥缓凝剂的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2011, (2):27-29.
- [5] 尤彩霞, 李军, 孙娜, 等. 电厂脱硫石膏制水泥缓凝剂二水石膏的研究[J]. 无机盐工业, 2019, (12):71-74.
- [6] 王盛铭, 陈瑜. 脱硫石膏-粉煤灰道路混凝土配制及开裂敏感性研究[J]. 公路工程, 2011, 36(6): 144-148.
- [7] 孙家瑛, 蔡明, 陆青清, 等. 脱硫石膏改性三渣混合料的强度和耐久性研究[J]. 中国市政工程, 2011, (6):68-70.
- [8] Antonio Telesca, Milena Marroccoli, Daniela Calabrese. Flue gas desulfurization gypsum and coal fly ash as basic components of prefabricated building materials[J]. Waste Management, 2013, 33(3):628-633.
- [9] 陆青清, 严军, 曹亚东, 等. 脱硫石膏在水泥稳定碎石基层的应用研究[J]. 上海建设科技, 2014, (1):74-76.
- [10] 周海龙. 脱硫石膏-粉煤灰复合水泥土耐久性与固化机理研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015.
- [11] Li Y, Liu X M, Li Z P. Preparation, characterization and application of red mud, fly ash and desulfurized gypsum based eco-friendly road base materials[J]. Cleaner Production, 2020, 284: 8260-8300.
- [12] 王小亮. 利用脱硫石膏制备新型石膏砌块的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [13] 王永生, 丁秋霞. 利用脱硫石膏生产相变石膏板的研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(8): 1-3.
- [14] 张翔. 影响纸面脱硫石膏性能的因素及关键技术[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- [15] 张帅, 杨国良, 杨翔, 等. 脱硫石膏制备底层抹灰石膏砂浆的研究[J]. 砖瓦, 2019, (1): 59-60.
- [16] 赵睿. 废石膏改性全废四渣基层路用性能研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.

- [17] Degirmenci N, Okucu A, Turabi A. Application of phosphogypsum in soil stabilization[J]. Building and Environment, 2007, 42(9): 3393-3398.
- [18] Tovazhnyansky L L, Meshalkin V P, Kapustenko P O, et al. Energy efficiency of complex technologies of phosphogypsum conversion[J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2013, 47(3): 225-230.
- [19] Reijnders L. Cleaner phosphogypsum, coal combustion ashes and waste incineration ashes for application in building materials: A review[J]. Building and Environment, 2007,42(2): 1036-1042.
- [20] Mashifana T, Okonta F N, Ntuli F. Geotechnical properties and application of lime modified phosphogypsum waste[J]. Materials Science, 2018, 24(3): 312-318.
- [21] Folek S, Walawska B, Wilczek B, et al. Use of phosphogypsum in road construction[J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2011, 13(2): 18-22.
- [22] Amrani M, Taha Y, Kchikach A, et al. Phosphogypsum recycling: New horizons for a more sustainable road material application[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 30:101267.
- [23] 焦延滨, 程继增, 吕新春, 等. 磷石膏结合无机材料用于路基材料的研究[J]. 磷肥与复肥, 2013, 28(3): 63-64.
- [24] 董满生, 凌天清, 肖文. 工业废料磷石膏在路基工程中的应用[J]. 华东公路, 2001(3): 55-58.
- [25] 唐庆黔, 凌天清, 董满生. 工业废料磷石膏在路基路面工程中的应用[J]. 山东交通学院学报, 2002, 10(2): 49-52.
- [26] 李章锋. 磷石膏改良土用作路基及基层填料的试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [27] 李章锋, 曹新文, 王春雷. 磷石膏改良土作路基填料可行性试验研究[J]. 路基工程, 2008(5): 157-158.
- [28] 陶松. 工业废渣磷石膏用作道路填料的性能研究[D]. 武汉: 武汉工业学院, 2012.
- [29] 克高果, 夏正求, 罗辉, 等. 煅烧磷石膏改性磷石膏废料的路用性能[J]. 土

- 本工程与管理学报, 2018, 35(4): 58-64.
- [30] 孟维正, 蒋关鲁, 袁德昭, 等. 改良磷石膏的路用性能[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1): 81-88.
- [31] 殷柯. 磷石膏基基层材料的路用性能以及工程应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [32] 沈卫国, 周明凯, 赵青林, 等. 粉煤灰磷石膏高早强路面基层材料的研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2001(2): 31-32.
- [33] 沈卫国, 周明凯, 余崇峻, 等. 磷石膏改性二灰路面基层材料的性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2003, 25(10): 34-38.
- [34] 周明凯, 张晓乔, 陈潇, 等. 水泥磷石膏稳定碎石路面基层材料性能研究[J]. 公路, 2016, 61(4): 186-190.
- [35] 董满生, 凌天清, 徐基立. 磷石膏对半刚性基层材料的作用机理[J]. 中国公路学报, 2002, 15(2): 11-15.
- [36] 吴开权, 卢勇, 张军, 等. 废磷石膏改性二灰碎石基层的探讨[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(11): 56-58.
- [37] 沈卫国, 姜舰, 张丽, 等. 磷石膏改性二灰路面基层材料的性能研究[J]. 公路, 2008, (01): 141-145.
- [38] Shen W, Zhou M, Zhao Q. Study on lime-fly ash-phosphogypsum binder[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(7): 1480-1485.
- [39] Shen W, Zhou M, Ma W, et al. Investigation on the application of steel slag-fly ash-phosphogypsum solidified material as road base material[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(1): 99-104.
- [40] 张英富, 童红明, 沈卫国, 等. 废石膏粉煤灰石灰结合料的研究[J]. 建材世界, 2009, 30(5): 45-47.
- [41] 瓦浩. 磷渣(磷石膏)路面基层材料的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [42] Zhao D, Zhang B, Shen W, et al. High industrial solid waste road base course binder: Performance regulation, hydration characteristics and practical application[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 313(1): 127879.

- [43] 丁红慧. 磷石膏改性二灰碎石料性能研究[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2011, 7(11): 102-105.
- [44] Zhou M, Shen W, Wu S, et al. Study on phosphogypsum fly ash lime solidified material[J]. Advances in Building Technology, 2002, 1: 929-934.
- [45] Ngo H T T, Dang V Q, Ho L S, et al. Utilization phosphogypsum as a construction material for road base: a case study in Vietnam[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2022, 7(1):1-10.
- [46] Wang C, Liu D, Huang Q. A new civil engineering material: normal temperature modified phosphogypsum embedded filler[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021,21(1): 1-13.
- [47] 刘开琼, 任翔, 吕正龙, 等. 改性磷石膏材料用于公路路面基层的应用研究[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(1): 70-71.
- [48] 徐泽友, 卢廷浩, 王一博. 改良磷石膏混合碎石料路用性能试验研究[J]. 常州工学院学报, 2008, 21(S1): 61-64.
- [49] 徐雪源. 磷石膏及其混合料的工程特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [50] 赵艳, 石名磊. 磷石膏混合料的再生[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 98-102.
- [51] 丁建文, 石名磊. 富含磷石膏道路底基层改良再生现场试验与应用[J]. 施工技术, 2009, 38(4): 98-100.
- [52] 赵德强, 张昺榴, 朱文尚, 等. 道路基层复合胶凝材料的性能调控[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(5): 1137-1143.

三、实施方案

3.1 拟解决的关键问题

- (1) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料活性提升与物相转化机制;
- (2) 胶凝材料宏微观性能协同优化;
- (3) 工程应用施工控制与长期服役性能稳定性。

3.2 主要研究内容及实施方案

- (1) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料优化设计与制备工艺研究
分析多源工业副产石膏的化学组分与矿物成分, 结合量化计算和理论分析研

究工业副产石膏中不同矿物成分的物相转化机理和微观结构变化,研究工业副产石膏活性的影响因素和提升方法;采用工业副产石膏、炉渣、矿渣和转晶剂等作为原料制备新型低碳胶凝材料,结合水化产物种类及含量,探明其物相转化与生长机制;分析脱硫石膏和磷石膏在胶凝材料水化过程中产生的交互作用,提出工业副产石膏基新型低碳胶凝材料的最优配比;分析不同的预处理和活化方式对胶凝材料水化产物的影响规律,研究新型低碳胶凝材料的最优制备工艺。

(2) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料工程性能与微结构特征研究

采用工业副产石膏基新型胶凝材料制备胶砂试样,依据浆体的流动度、析水率等指标,研究水灰比对胶砂浆体流动性及稳定性的影响;结合工作性能、配合比、力学性能、体积稳定性能、耐久性能及微观结构性能等宏微观指标对低碳高早强胶凝材料性能指标进行评估,并结合水化热测试结果,分析其水化动力学,揭示低碳高早强胶凝材料的水化特性,分析其不同组分之间的协同作用机理,并进一步优化其组成与制备工艺。

(3) 工业副产石膏基道路基层材料制备关键技术研究

利用工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料制备稳定道路基层材料,对其力学性能和体积稳定性进行评价;分析道路基层材料的路用性能变化规律,探讨其在道路基层中的应用可行性及其关键控制因素;分析其强度发展与混合料配合比设计参数之间的响应机制,提出低碳高早强胶凝材料基道路基层材料的配合比设计关键控制指标。

(4) 工业副产石膏基道路基层材料耐久性研究

利用工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料制备道路基层材料,对其耐久性进行研究。采用疲劳试验方法,分析基层材料疲劳寿命发展规律,通过数理统计方法处理疲劳试验数据,对基层材料抗疲劳性能进行评价;采用浸水试验方法,研究基层材料水稳定性能变化规律及影响因素,对基层材料水稳定性能进行评价;采用冻融试验方法,研究基层材料抗冻性能变化规律及影响因素,对基层材料抗冻性能进行评价;采用收缩变形试验方法,研究基层材料变形特性规律,揭示基层材料体积变形机理,并提出控制基层材料体积变形的关键技术措施。

(5) 工业副产石膏基固化路基填料制备与性能研究

采用低碳高早强胶凝材料作为固化剂制备路基填料,研究固化剂掺量、含水

率、压实度和养护龄期对路基填料力学性能的影响,通过 CBR 试验、无侧限抗压强度试验等试验研究其力学性能变化规律。利用 XRD 分析确定不同龄期生成的水化产物,研究其性能发展机理。通过长期浸水试验和收缩试验研究固化土路基填料耐久性能变化规律,结合力学性能、耐久性能和经济性研究提出其最佳材料组成与施工方式。

(6) 工业副产石膏基道路基层与固化路基施工控制与效益分析

依托试验工程,分析工业副产石膏基道路基层材料与固化路基填料在道路工程中应用的施工控制技术;开展工后观测研究,采用“现场监测+定期检测”相结合的方法,对力学性能、体积稳定性及耐久性进行长期跟踪观测,分析材料服役性能演化规律;分析工业副产石膏基道路基层材料与固化路基填料在道路工程中应用产生的直接经济效益和间接经济效益,结合其长期服役性能跟踪观测,评估其在道路工程中高效协同利用产生的经济效益。

3.3 技术路线

3.3.1 研究技术方案

(1) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料优化设计与制备工艺研究

①采用化学分析、矿物相分析和热分析等手段,系统表征脱硫石膏、磷石膏等工业副产石膏的组成与反应活性特征,构建基础性能数据库。

②结合热力学与反应动力学分析,揭示多组分胶凝体系中不同矿物组分的物相转化路径及微结构演化机理。

③以工业副产石膏、炉渣、矿渣及转晶剂等为主要原料,构建低碳高早强胶凝材料体系,明确原料比例对水化产物形成及早期性能的影响规律。

④分析脱硫石膏与磷石膏在水化过程中的协同与抑制作用,建立水化特征与力学性能、体积稳定性之间的响应关系,提出材料优化配比与制备工艺路线。

(2) 工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料工程性能与微结构特征研究

①通过胶砂试验系统测试浆体流动性、稳定性及力学性能,明确水灰比及材料组成对工程性能的影响规律。

②结合工作性能、力学性能、体积稳定性及耐久性等指标,对胶凝材料宏观性能进行综合评价。

③采用水化热测试分析材料早期反应特征与水化动力学过程,揭示早期强度

形成机制。

④通过 XRD、SEM 等手段表征水化产物组成与微结构特征，阐明组分协同作用机理，并指导材料体系优化。

(3) 工业副产石膏基道路基层材料制备关键技术研究

①基于低碳高早强胶凝材料制备道路基层混合料，系统评价其力学性能与体积稳定性，验证工程适用性。

②分析基层材料强度与路用性能随龄期的发展规律，明确影响其工程性能的关键控制因素。

③建立强度发展特征与配合比参数之间的关系，提出工业副产石膏基道路基层材料的配合比设计方法与技术指标。

(4) 工业副产石膏基道路基层材料耐久性研究

①通过疲劳试验分析基层材料在重复荷载作用下的性能衰减规律，评价其抗疲劳能力。

②通过浸水试验研究基层材料水稳定性能变化规律及影响因素，系统评价基层材料水稳定性能。

③采用冻融试验研究基层材料抗冻性能变化规律及影响因素，系统评价基层材料抗冻性能。

④结合收缩试验与微结构分析，揭示基层材料体积变形机理，提出改善体积稳定性的技术措施。

(5) 工业副产石膏基固化路基填料制备与性能研究

①以低碳高早强胶凝材料为固化剂制备固化路基填料，研究固化剂掺量、含水率、压实度及养护条件对力学性能的影响规律。

②通过 CBR 和无侧限抗压强度等试验，系统评价固化填料力学性能发展特征。

③结合 XRD 等微观分析手段，揭示固化填料性能演化的水化机理。

④综合浸水和收缩试验结果，系统评价固化路基填料的耐久性能，并提出合理的材料组成与施工技术建议。

(6) 工业副产石膏基道路基层与固化路基施工控制与效益分析

①依托试验工程，研究工业副产石膏基道路基层材料与固化路基填料的施工

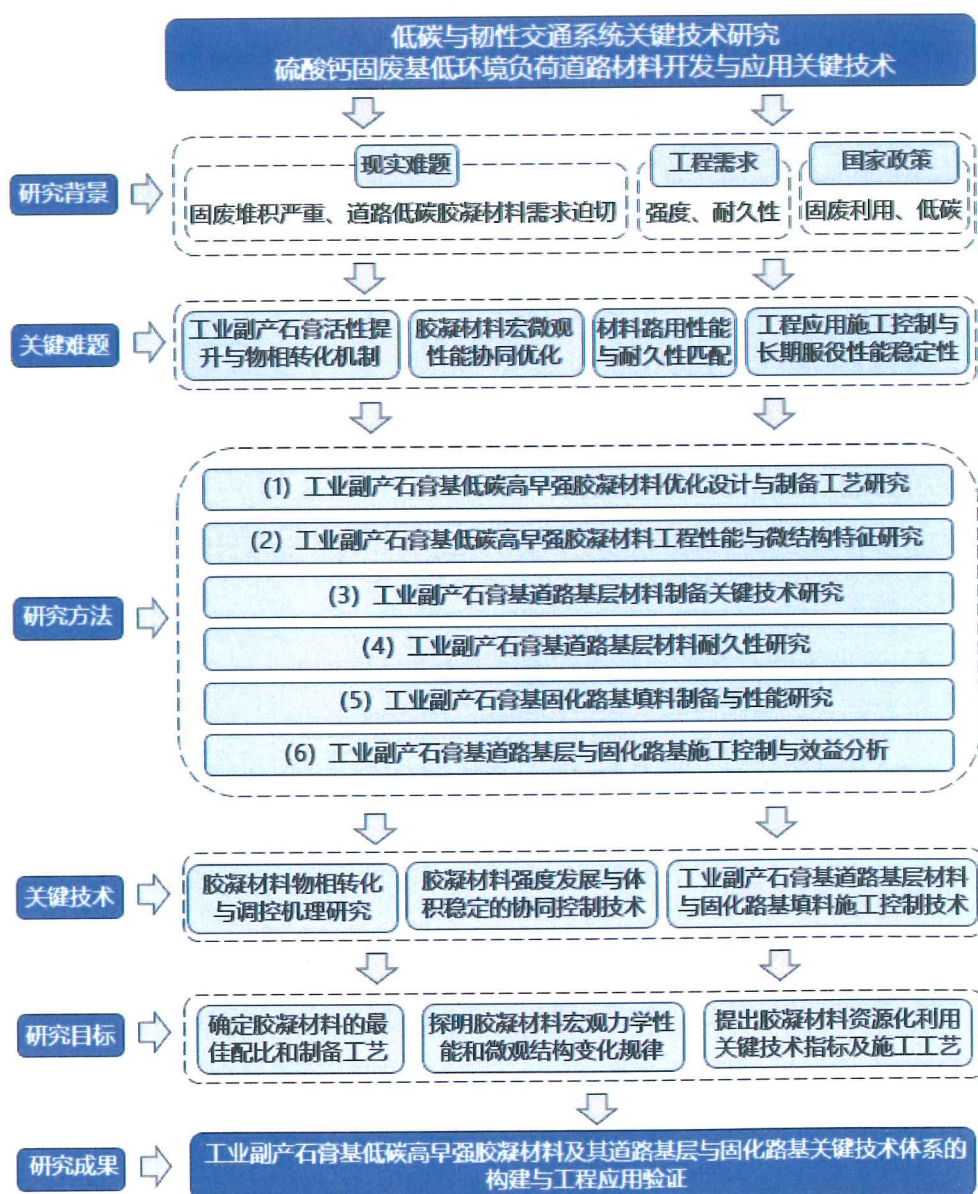
工艺及质量控制要点。

②开展工后观测研究，采用“现场监测+定期检测”相结合的方法，对力学性能、体积稳定性及耐久性进行长期跟踪观测，分析材料服役性能演化规律。

③通过与传统道路材料对比分析，评估其在工程应用中的经济效益与环境效益。

④结合长期服役性能监测结果，综合评价工业副产石膏基道路材料的工程应用效果与推广价值。

3.3.2 工作流程



3.4 后续技术改造或基本建设计划的衔接

本项目研究成果可供以下部门和单位应用推广：

(1) 公路建设与养护管理部门

省级交通运输主管部门、公路事业发展中心及公路养护单位可在新建及养护工程中推广应用本项目形成的工业副产石膏基低碳高早强道路基层材料与固化路基技术，用于提升基层结构性能、缩短施工周期并降低工程碳排放水平，服务绿色公路建设与养护提质增效。

(2) 公路勘察设计与施工单位

公路勘察设计与施工单位可将本项目提出的低碳胶凝材料组成设计方法、道路基层与固化路基配合比设计原则及施工控制要点，应用于道路工程方案设计和现场施工组织，提升道路结构安全性、耐久性和资源综合利用水平。

(3) 道路工程试验检测与科研机构

试验检测与科研机构可参考本项目建立的工业副产石膏基道路材料性能评价体系 and 耐久性测试方法，用于新材料性能验证、技术标准完善及相关科研与检测工作，推动低碳道路材料技术规范化应用。

(4) 工业副产石膏资源化利用相关企业

脱硫石膏、磷石膏等工业副产石膏产生与加工企业，可依托本项目形成的材料制备技术路线和工程应用模式，拓展工业副产石膏在道路工程领域的高附加值利用途径，促进固废资源化利用和产业协同发展。

3.5 有关技术经济指标

开发出工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料，其 3d 抗压和抗折强度分别达到 20.0MPa 和 2.5MPa 以上。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

(1) 长安大学

直属国家教育部，是国家首批“211 工程”重点建设大学、国家“985 优势学科创新平台”建设高校、国家“双一流”建设高校。学校现有 9 个一级学科博士点，33 个一级学科硕士点。有 9 个博士后科研流动站。工程学、地球科学、

材料科学、环境科学与生态学等 4 个学科进入 ESI 球前 1%。现有 82 个本科专业，其中 23 个专业入选国家“双万计划”一流建设专业，17 个专业通过国家工程教育认证。学校稳居中国大学百强，土木与交通学科位列 U.S.News 全球大学第 44 名，被誉为公路交通人才培养的“黄埔军校”、科技创新的“金名片”。学校矢志原始创新，构建“大团队、大平台、大项目、大成果”四位一体科技创新体系，年度科研经费突破 8.5 亿元，年度国家自然科学基金、国家社会科学基金超过 110 项。近年来获得国家科学技术进步奖一等奖、二等奖 23 项。年度授权专利 1300 余项。先后攻克了特殊地区公路建设成套科学技术难题，研发了黄土滑坡及大型崩塌临灾预警系统，解决了地铁建设中的地裂缝风险防治问题。

新时代，学校积极布局“智慧+”“绿色+”“大数据+”等学科交叉战略，旨在改造传统、升级产业、赢得未来。学校注重成果推广，科研成果应用于被誉为“国之重器”的港珠澳大桥、全球空港新标杆北京大兴国际机场等超级工程建设，支撑了世界最大跨径的公铁两用斜拉桥沪通长江大桥、世界海拔最高的青藏公路、亚洲最长公路隧道秦岭终南山隧道、第一条沙漠高速公路榆靖高速等诸多有重要国际影响力的世纪工程建设。与数十家世界 500 强企业建立了深度战略合作关系。

（2）渭南市交通运输局

市政府组成部门，1972 年 4 月，渭南地区交通局成立；1995 年渭南撤地设市，更名为渭南市交通局；2010 年 5 月，因结构改革，更名为渭南市交通运输局。渭南市交通运输局机关设科室 7 个。党政办公室、综合规划科、建设管理科、运输管理科、财务内审科、安全执法科、交通战备办公室。设下属单位 13 个，其中事业单位 8 个，分别是渭南市公路局、渭南市交通运输服务中心、渭南市农村公路服务中心、渭南市交通运输综合执法支队、渭南市交通工程质量监督站、渭南市公路工程建设处、渭南市轨道交通发展中心、渭南市邮政业安全中心；企业 5 家，分别是渭南交通投资有限公司、渭运集团、渭南市公共交通集团有限公司、渭南市宏业公司、渭南盛通交通服务有限责任公司。先后承担交通科技项目多项，多人获省市级荣誉称号。

（3）渭南交通投资有限公司

渭南交通投资有限公司是经市政府批准，于 2018 年成立的国有独资公司，

隶属渭南市国资委，由渭南市交通运输局进行行业指导，注册资本两千万元，法定代表人裴林，公司位于渭南市东风大街创业大厦二楼。公司内设六个部门，分别为综合办公室、财务部、内审部、项目管理部、发展管理部、法务部，公司下辖二级子公司九家，三级子公司四家，参股公司两家。经营范围为交通基础设施建设项目设计、运营和管理；养护工程设计、施工；新材料新技术研究开发；公路试验检测、技术咨询、充电桩、设备租赁、房屋租赁、汽车租赁、货物运输、仓储服务；交通信息化建设、信息服务业务、GPS 监控、服务区管理与经营。

(4) 渭南国控环保科技有限公司

渭南国控环保科技有限公司成立于 2022 年，是经渭南市政府批准设立的国有企业，公司注册资本约五百万元，主要从事环保产业相关投资与技术服务，企业办公地址位于陕西省渭南市。公司业务范围主要包括：环保咨询与技术服务、固体废物治理、生态修复、再生资源回收加工与销售等领域；同时开展煤制品及化工产品生产（不含许可类化工产品），并经营煤炭、金属材料、非金属矿及建筑材料等产品贸易。公司还提供技术开发、技术咨询与推广服务，并从事建筑物拆除（爆破除外）、建筑垃圾清运、道路货物运输、装卸搬运及工程机械设备租赁等工程配套服务，同时开展电动汽车充电基础设施运营、停车场服务及货物进出口等业务。

4.2 技术力量及人员构成

姓 名	单 位	性 别	年 龄	技术 职称	专 业	在项目中担任 具体工作
何锐	长安大学	男	1984.05	正高级	道路工程	项目总负责
郭建	渭南市交通运输局	男	1982.12	副高级	道路工程	项目统筹管理
原朝林	渭南市交通运输局	男	1984.07	副高级	桥梁工程	现场技术负责及试验应用
郑少华	渭南交通投资有限公司	男	1986.12	中级	道路工程	依托工程规划
王振军	长安大学	男	1978.12	正高级	道路工程	系统架构设计
孙立龙	渭南交通投资有限公司	男	1989.05	中级	道路工程	依托工程性能观测
齐琳	长安大学	女	1981.10	副高级	道路工程	复合胶凝体系设计
赵林渭	渭南国控环保科技有限公司	男	1986.09	中级	道路工程	现场试验与性能评价
张煜博	渭南市交通运输局	男	1999.06	助理级	桥梁工程	现场试验与性能评价
郭豪彦	长安大学	男	1993.03	中级	道路工程	微结构优化调控

迟兵	渭南国控环保科技有限公司	男	1985.05	中级	道路工程	现场施工质量控制
孙仕伟	长安大学	男	1990.12	中级	道路工程	室内试验研究
魏智毅	长安大学	男	2001.03	无	道路工程	材料性能评价

4.3 各自承担的主要工作

(1) 长安大学

负责制定研究大纲和总体研究方案；负责编写立项申请书和可行性研究报告；负责工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料的物相转化规律、水化过程及性能形成机理研究；负责胶凝材料体系组成设计、配合比优化及制备工艺参数确定；负责研究报告的撰写工作；完成项目鉴定和验收工作。

(2) 渭南市交通运输局

参与制定总体研究方案；参与示范性工程建设；协调示范性工程建设；组织现场项目施工及自筹经费。

(3) 渭南交通投资有限公司与渭南国控环保科技有限公司

示范性工程相关设计。

4.4 项目主要负责人情况

项目总负责人：何锐

美国弗吉尼亚大学联合培养博士，博士后经历，教授、博士生导师，陕西省青年科技新星、交通部青年科技英才，美国普渡大学访问学者，交通部交通运输行业重点领域创新团队“特殊地区公路建设与养护材料创新团队”核心成员。

在科学研究方面长期从事建筑材料及道路工程建筑材料研究，立足于混凝土建筑材料结构形成理论与性能改善技术，围绕城乡发展与基础设施建设和养护过程中出现的重大理论与实践课题开展研究，在先进水泥基复合材料和环保型铺装新材料等方面优势突出。主持国家自然科学基金项目 2 项，国家重点研发计划子题 2 项、中国博士后科学基金面上资助项目 1 项、陕西省创新人才计划项目 1 项、陕西省重点研发计划项目 2 项等各类科研项目 50 余项。重视理论与工程实践的结合，取得一系列创新性成果，并在西藏圭嘎拉隧道（全球海拔 4000m 以上最长的公路隧道）等多个国家重大工程中得以应用。作为核心成员入选交通部重点领域创新团队“特殊地区公路建设与养护材料创新团队”，并以团队负责人获批 2023 年度陕西高校青年创新团队“严酷环境下长寿命混凝土创新团队”。以

一作或通讯作者在 Cement and Concrete Composites、《中国公路学报》等行业期刊发表科技论文 80 余篇，其中 SCI/EI 检索 42 篇，1 篇入选“F5000-中国精品科技期刊顶尖学术论文”；以第一发明人授权发明专利 34 件，专利转化 5 件；获省部级科技进步奖 6 项；编制行业标准 1 部、地方标准 5 部；获交通部青年科技英才、陕西省青年科技新星等荣誉。多项技术成果在国家重大和重点工程中得到推广应用，对于促进我国道路、建筑材料发展和相关行业技术的进步起到积极作用。

五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件

5.1 依托工程（工作）概况

本项目依托 209 省道临蒲界至故市公路改建工程开展成果落地与长期性能观测。209 省道临蒲界至故市公路改建工程是市级重点项目，项目采用 PPP 模式实施，路线全长 17.46km，总投资 3.4 亿元。项目起点位于 209 省道蒲城县和渭南市临渭区交界处韩家村，向南沿旧路设线，经华连村、从蔺店镇东侧设新线绕行通过后，继续沿旧路经北师村、朱家村、故市至终点巴邑村北。试验段优先选择具有代表性的段落，综合考虑交通荷载水平、气候环境条件、地基类型及施工条件等因素，确保能够全面反映材料的工程适用性与性能差异。

全线采用一级公路技术标准，新建桥涵设计汽车荷载采用公路—I 级，设计速度 80km/h，路基宽度 24.5m，其他各项技术指标按现行有关规范、规定执行。全线共设平面交叉 37 处，其中与等级公路交叉 5 处（一处采用环形交叉，4 处采用分道转弯形式）；与乡村道路交叉 32 处，采用加铺转角式形式。

目前，该项目前期手续已办理完结，于 2023 年 10 月 30 日开始复工建设，目前完成 8 公路路基及 8 道涵洞。本依托工程可以为本项目的实施提供完整的应用场景，并且本项目也能推动其低碳与绿色化建设，降低工程成本，并为类似工程提供参考和示范作用。

5.2 投资来源

经详细论证并编制经费预算，本课题研究总投入为 40.00 万元。其中陕西省交通运输厅拨付专项经费 19.99 万元，渭南市交通运输局、渭南交通投资有限公司与渭南国控环保科技有限公司自筹 20.01 万元，以确保本项目各项工作的顺利开展。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

(1) 2026.03~2026.05

开展项目启动与总体技术路线细化,系统收集脱硫石膏、磷石膏等工业副产石膏原料,完成化学组成、矿物组成及基本物理性能测试;同步调研典型道路工程应用场景,明确试验体系与示范工程技术需求,完成研究方案与实施计划的细化部署;完成项目总体布局与研究基础条件建设。

(2) 2026.06~2026.11

围绕工业副产石膏活性提升与多组分协同调控,开展低碳高早强胶凝材料组成设计与水化机理研究;系统分析不同原料配比对早期强度、水化产物及反应动力学的影响规律,初步形成性能稳定的胶凝材料体系;形成工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料基本配方,发表学术论文 1 篇。

(3) 2026.12~2027.05

在前期研究基础上,进一步优化胶凝材料制备工艺与施工参数,开展道路基层及固化路基材料的中试试验与工程适应性研究;通过现场试验验证材料的施工性能、强度发展与体积稳定性,完善工程应用技术参数;建立具备工程可实施性的材料配制与施工技术体系,申请专利 1 项。

(4) 2027.06~2027.11

依托示范工程开展工业副产石膏基道路基层与固化路基材料应用示范,实施全过程施工质量控制;系统开展服役性能监测与耐久性评价,分析其力学性能演化、环境适应性及经济与环境效益;建成示范工程 1 处,发表学术论文 1 篇。

(5) 2027.12~2028.03

对示范工程长期监测数据进行系统整理与综合分析,总结项目研究成果与工程应用经验;形成可推广的技术路线和应用建议,完成研究报告、成果汇编及结题验收材料准备;完成项目总结与成果集成,编写施工技术指南,形成结题报告并支撑项目验收。

5.4 组织管理形式

为保证本课题能够高质、高效、按期达到预定目标,必须建立全面、高效的组织管理机制。根据项目研究总体思路和目标,将根据研究内容分别确定负责人。

(1) 负责人按研究工作的技术目标、技术路线、系统体系与结构确定具体

工作要求。工作责任包括需要完成的工作内容、工作效果完成工作的时间、经费预算等。

(2) 负责人根据研究工作安排编制季度和半年度工作计划。计划内容主要是对前期工作的总结,包括:计划完成情况、存在问题及解决措施、后期计划的调整等。

(3) 严格执行分内容合同,按规定的内容和进度完成任务,并接受课题负责单位检查;项目经费使用严格遵守相关财务管理规定执行。

六、项目经费估算及资金筹措情况

对经费估算及资金筹措情况说明，提供所需经费测算说明。

经费投入（万元）		经费支出（万元）			
科 目	估算数	科 目	总经费	厅补经费	其他经费
省交通运输厅补助	19.99	合 计	35.00	17.76	17.24
工程配套研究经费	0.00	1.设备费	0.00	0.00	0.00
单位自筹	20.01	（1）购置设备费	0.00	0.00	0.00
其他经费	0.00	（2）试制设备费	0.00	0.00	0.00
		（3）设备改造与租赁费	0.00	0.00	0.00
		2.业务费	30.00	15.26	14.74
		（1）材料费	10.00	6.00	4.00
		（2）测试化验实验加工费	13.00	6.26	6.74
		（3）燃料动力费	0.00	0.00	0.00
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	3.00	1.00	2.00
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	3.00	1.50	1.50
		（6）其他费用	1.00	0.50	0.50
		3.劳务费	5.00	2.50	2.50
		（1）专家咨询费	1.00	0.50	0.50
		（2）聘用人员劳务费	0.00	0.00	0.00
		（3）其他劳务费	4.00	2.00	2.00
		（二）间接费用	5.00	2.23	2.77
		4.管理费	5.00	2.23	2.77
		5.绩效支出	0.00	0.00	0.00

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	0
		（2）实用新型	1
		（3）外观设计	0
		2.软件著作权授权数（项）	0
		3.发表论文（篇）	2
		（1）其中 SCI 索引收录数	0
		（2）其中 EI 索引收录数	0
		（3）其他	2
		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	0
		（1）国际	0
		（2）国家	0
		（3）省级	0
		2.获奖项数	0
		（1）国家奖项	0
		（2）部、省奖项	0
		（3）地市级奖项	0
		3.其他科技成果产出	2
		（1）新工艺（或新方法模式）	0
		（2）新产品（含农业新品种）	0
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	1
		（6）中试线	0
		（7）生产线	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	是
		(2) 中试（样品样机）	否
		(3) 小批量	否
		(4) 规模化生产	否
	人才引育	1. 引进高层次人才	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		2. 培养高层次人才	2
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	10
		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）	0
		2. 科研仪器设备利用率（%）	0
		3. 孵化科技型企业（个）	0
		4. 转化科技成果（个）	1
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	100
		2. 新增销售（万元）	100
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	10
	社会效益	1. 新增税收（万元）	5
		2. 新增就业人数	20
		3. 就业培训（人次）	0
		4. 带动农民增收（万元）	0
		5. 培训和指导科技服务（人次）	20
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	1
		8. 建立示范基地（亩数）	0
		9. 节约资源能源	0
		10. 环保效益	0
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

8.1 项目预期目标

本项目结合室内试验、理论分析和实体工程对工业副产石膏在道路工程中的高品质协同利用关键技术展开研究，预期达到以下目标：

- (1) 确定工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料的最佳配比和最优制备工艺；
- (2) 探明低碳高早强胶凝材料宏观力学性能和微观结构性能的变化规律；
- (3) 提出工业副产石膏基道路基层材料与固化路基填料在道路工程中资源化利用的关键技术指标及施工工艺。

8.2 提交的研究成果及其形式

- (1) 开发出工业副产石膏基低碳高早强胶凝材料，其 3d 抗压和抗折强度分别达到 20.0MPa 和 2.5MPa 以上；
- (2) 建设示范性工程 1 处；
- (3) 发表相关论文 2 篇；
- (4) 申请专利 1 项；
- (5) 编写施工技术指南 1 部；
- (6) 提交课题研究报告 1 部。

8.3 经济、社会、环境效益分析

(1) 经济效益分析

本研究以工业副产石膏等低成本固体废弃物为主要原料，替代部分传统水泥类材料，显著降低道路基层与路基工程的材料成本和综合造价。通过构建低碳高早强胶凝材料体系，可缩短施工周期、降低养护投入，提高工程周转效率，减少全寿命周期维护费用。同时，研究成果可推动工业副产石膏资源化利用与相关材料产业化发展，带动上下游企业协同创新，形成稳定的经济增长点，具有良好的市场推广前景。

分析方法采用全寿命周期成本分析（LCC）与对比分析法，对比传统水泥基材料体系与本研究材料体系的经济性。评价指标包括材料成本、施工成本、养护成本、工期缩短率及全寿命周期成本降低率等。

(2) 社会效益分析

本研究成果可有效提升道路基层和路基结构的力学性能与耐久性,增强道路工程整体安全性与服役可靠性,为区域交通基础设施稳定运行提供技术支撑。通过促进工业副产石膏的大规模、高附加值利用,有助于缓解固废堆存压力,改善区域生产生活环境。研究成果在公路工程中的推广应用,可提升工程建设与养护的技术水平,对推动交通基础设施高质量发展和区域协调发展具有积极社会意义。

分析方法采用定性分析与定量指标相结合的方法进行综合评价,评价指标包括道路使用性能提升程度(强度、耐久性指标)、工程安全性提升、固废资源化利用量及区域环境改善程度等。

(3) 环境效益分析

本研究以工业副产石膏为核心原料,实现固体废弃物的资源化和规模化利用,可显著减少石膏堆存占地及其潜在环境污染风险。低碳高早强胶凝材料在制备和应用过程中有效降低水泥用量和能源消耗,减少二氧化碳排放,符合交通运输领域绿色低碳发展要求。

分析方法采用全生命周期评价方法(LCA)与碳排放核算方法进行定量分析,评价指标包括单位材料碳排放量、CO₂减排率、能源消耗降低率、固废利用率及堆存减少量等。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见



单位负责人: (签字)

陈建勋

科研项目专用章

年 月 日

硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发 与应用关键技术 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“硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术”（项目编号：25-78K）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.进一步明确研究对象，重点突出研究内容；
- 2.调整研究成果与提交形式。

主任委员：



2026年3月19日

专家审查意见表

项目名称	硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术				
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	15689101111

评审意见

固废再利用近年来应用较多。本项目属于相关研究现状，开展相关研究，实施必要，同意研究立项评审。建议如下：

1. 研究内容应与投标文件中相关研究内容相一致；
2. 明确研究对象，确定主要研究内容；
3. 成本核算形式及补充施工技术规范；
4. 环境效益分析及环境影响分析方法。编制材料：环境效益分析及环境影响评价；
5. 3d抗折和抗折（压）量记录应明确。

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，纸面不散，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术				
专家姓名	张国民	职务/职称	正高工	专业	材料学
专家单位	陕西高速公路工程检测有限公司			联系电话	18393108280

评审意见

项目结合了工业副产石膏废渣为主要材料，内容详实，目标明确。需进一步细化以下内容。

1. 题目“低环境负荷”如何评价？“低环境负荷”
2. 首先应对工业副产石膏进行评价。
3. 基层、垫层材料。根据不同层位，等级不同，但都要满足规范要求。
4. 工业副产石膏、炉渣、矿渣，本身不具有稳定性，所以如何保证研发？
5. 书写规范性。CaSO₄·2H₂O，等大小写。

评审专家（签字）：

张国民

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	《硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术》				
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

25-78K 项目《硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术》，研究结合工程实际，研究大纲内容较全面，主要研究内容和实施方案可行。

建议：结合工程试验路段，依据《无机结合料稳定材料试验规程》，围绕配合比、力学性能、水稳定性、变形、耐久性、微观性能，深入研究其路用性能。如原材料性能、混合料配合比与物理性能、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量、弯拉强度、疲劳性能、浸水强度损失、抗冲刷试验、干湿循环试验、冻融试验、干缩试验、温缩试验、膨胀试验、耐久性试验等，确保试验路段成功，并编写施工技术指南，使研究成果具备推广应用价值。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 19 日

专家审查意见表

项目名称	硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术				
专家姓名	闫卫喜	职务/职称	副总经理/正高级	专 业	公路桥梁
专家单位	天津高速公路集团有限公司			联系电话	18502239132
评 审 意 见 该大纲编制格式规范，内容完整，技术路线和研究方法清晰，预期成果和经费预算合理，满足大纲编制要求，同意通过审查。 相关建议： 1、针对固废来源多源性、不稳定性等特点要对周边原料来源进行调研并研究检测方法、确定相关指标； 2、明确试验段选择原则和具体段落； 3、细化工后观测的方法和路线。 评审专家（签字）：  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	硫酸钙固废基衬环境负荷道路材料开发与推广应用关键技术研究				
专家姓名	郭忠印	职务/职称	教授	专业	交通工程
专家单位	同济大学			联系电话	13918264820

评审意见

1. 项目编制是研究大(同)内容全面, 技术路线可行, 目标明确, 同意通过项目研究大(同)评审。

2. 建议:

(1) 关键施实中重点为胶凝材料的研究, 关于如何开展低层材料和高基材料中应用研究的技术路线应进一步明确。

(2) 关于作为基层材料和高基材料的研究, 应进一步针对具体的工程应用方案, 关注对环境的影响。

(3) 关于硫酸钙固废材料的应用已有一些国家标准或地方标准, 研究中可借鉴。

评审专家(签字):

郭忠印

2020 年 3 月 19 日

(本意见入档, 应填写工整, 纸面不敷, 可另加纸)

硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术 (项目编号: 25-78K)

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	线上参会
5	委员	郭忠印	同济大学	交通运输 工程	交通运输 工程	教授	线上参会

专家意见处理表

项目名称：硫酸钙固废基低环境负荷道路材料开发与应用关键技术 （项目编号： 25-78K ）

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. 研究内容应与投标文件相应研究内容相一致； 2. 明确研究对象，突出研究内容； 3. 成果提交形式应补充施工技术指南； 4. 环境效益分析、经济效益分析应明确分析方法与评价指标； 5. 3d 抗压和抗折强度的论证应明确。	1. 研究内容与投标文件的研究内容是一致的； 2. 本项目研究对象明确为工业副产石膏基低碳高强胶凝材料及其道路工程应用，研究内容重点围绕材料设计、性能调控与工程应用展开； 3. 已在 8.2 成果提交形式中补充施工技术指南； 4. 已在 8.3 中补充分析方法与评价指标； 5. 本项目将通过室内试验与试验段验证相结合的方式，对 3d 抗压与抗折强度进行综合论证，以确保其工程适用性与可靠性。
2	张国宏	1. 题目“低环境负荷”如何评价？ 2. 首先应对工业副产石膏进行评价； 3. 基层与路基填料，根据不同层级，等级各不同，但都要满足规范要求； 4. 工业副产石膏、炉渣、矿渣，本身不具有稳定性，所以如何保证研发？ 5. 书写规范性，大小写等格式。	1. 本项目在研究内容中从多方面体现“低环境负荷”评价：如通过降低水泥用量与能耗体现低碳特性，在服役性能与耐久性研究中国体现材料全寿命周期环境影响降低，通过固废资源化利用量评估其环境减负效果，同时在效益分析中开展碳排放与资源利用评价，整体涵盖“低环境负荷”的相关评价内容； 2. 已在 3.2 研究内容（1）中对工业副产石膏的化学组成、矿物成分及活性等进行了系统分析与评价； 3. 已在研究过程中充分考虑不同层级与道路等级的技术要求，相关材料性能指标均以现行规范为依据，确保满足基层与路基填料的工程应用要求； 4. 本项目在 3.2 研究内容（1）中分析不同的预处理和活化方式对胶凝材料水化产物的影响规律，在研究内容（2）中分析不同组分之间的协同作用机理，并优化制备工艺。结合后续性能及微观结构研究，确保研发成果达标； 5. 已对相关书写格式进行修改。

3	裴晓梅	结合工程试验路段，依据《无机结合料稳定材料试验规程》，围绕配合比、力学性能、水稳定性、变形、耐久性、微观性能，深入研究其路用性能。如原材料性能、混合料配合比与物理性能、无侧限抗压强度、劈裂抗拉强度、抗压回弹模量、弯拉强度、疲劳性能、浸水强度损失、抗冲刷试验、干湿循环试验、冻融试验、干缩试验、温缩试验、膨胀试验、耐久性试验等，确保试验路段成功，并编写施工技术指南，使研究成果具备推广应用价值。	1. 已在 3.2 研究内容 (2) ~ (4) 中补充相关路用性能研究； 2. 已在 8.2 成果提交形式中补充施工技术指南。
4	闫卫喜	1. 针对固废来源多样性、不稳定性等特点，要对周边原料来源进行调研并研究检测方 法，确定相关指标； 2. 明确试验段选择原则和具体段落； 3. 细化工后观测的方法和路线。	1. 已在 3.2 研究内容 (1) 中补充工业副产石膏多源性研究，并通过化学组分与矿物成分检测开展相关研究； 2. 已在 5.1 中补充试验段选择原则，具体段落将在实施过程中根据工程条件进一步细化落实； 3. 已在 3.2 研究内容 (6) 中补充工后观测方法和路线。
5	郭忠印	1. 实施方案中为胶凝材料的研究，关于如何开展在基层材料和路基填料中应用研究的技术路线，应进一步明确； 2. 关于作为基层材料和路基填料的研究，应进一步针对具体的工程应用方案，关注对环境的影响； 3. 关于硫酸钙固废材料的利用已有一些团体标准或地方标准，研究中可借鉴。	1. 已在 3.2 研究内容 (3) ~ (5) 中明确基层材料与路基填料应用的相关研究，并在 3.3 中开展了技术路线设计； 2. 本项目针对 209 省道临蒲界至故市公路改建工程开展具体的工程应用方案研究，并在 8.3 中进行环境效益研究； 3. 本项目在研究方案中借鉴了相关标准。

大纲评审委员会专家（签字）：



项目负责人（签字）：



