

项目合同编号：25-81K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术
研究

承担单位：长安大学

项目负责人：关博文

通讯邮编、地址：陕西省西安市南二环中段 710064

传真、电话：02982334849

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：25-81K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术
研究

承担单位：长安大学

项目负责人：关博文

通讯邮编、地址：陕西省西安市南二环中段 710064

传真、电话：02982334849

起止年限：2026 年 3 月 至 2028 年 3 月

陕西省交通运输厅制

一、项目主要研究内容

1. 主要研究内容

(1) 基于活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术研究

研究通风急冷等方法对热法炼镁排出镁渣内部晶体结构的影响,分析初始温度、降温速率等参数对镁渣中 C_2S 和 MgO 结构特征的作用;探究添加剂对 C_2S 晶型转变的抑制效果;基于力学性能与收缩特性测试,建立参数、晶体特征与镁渣活性、膨胀特性间的关系,提出活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术。

(2) 镁渣-水泥复合胶凝材料强度-膨胀协同调控技术研究

采用“先磨后混”工艺制备急冷镁渣-水泥复合胶凝材料,研究不同细度、掺配比例镁渣对复合胶凝材料性能的影响,建立强度和膨胀协同发展模型,提出制备技术。从微观水化进程出发,系统研究水化产物相演变,定量表征关键组分形成速率,探明膨胀与强度性能差异的关键致因;基于相关理论定量分析浆体内部结晶应力,揭示补偿收缩效应机理。

(3) 低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料设计与路用性能评价

基于常用材料组成设计方案,从材料内部结构角度出发,结合贝雷法与主骨料空隙填充法,提出间断级配的抗裂型骨料级配设计方法。研究不同镁渣-水泥复合胶凝材料掺量下的力学性能变化规律,分析其抵抗收缩开裂能力,评价抗干湿循环和冻融循环性能。以相关试验结果为响应值,建立响应面模型,提出不同交通等级条件下材料组成设计建议。借助多种技术分析微观结构,揭示强度形成及抗裂性能提升机理。

(4) 镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料施工关键技术与综合效益评价

选择合适段落进行镁渣-水泥稳定碎石混合料基层施工试验段，总结施工制备、现场拌合、摊铺和压实等工艺经验，形成施工技术指导。跟踪检测试验路，观测裂缝形式和数量，验证室内试验结论。计算生命周期环境影响得分和成本，定量计算社会影响潜值，从力学性能、环境、成本和社会影响角度综合评价综合效益。

2. 技术关键

(1) 材料性能精准调控关键技术：聚焦镁渣晶体与复合胶凝材料性能优化。研究通风急冷、添加剂对镁渣晶体结构的作用，建立参数、晶体特征与材料活性、膨胀特性的关系；通过“先磨后混”工艺制备复合胶凝材料，从微观水化进程揭示膨胀与强度差异原因，构建强度 - 膨胀协同发展模型，实现材料性能精准调控。

(2) 基层材料应用与效益评估关键技术：涵盖基层材料设计与施工效益评估。基于材料内部结构提出抗裂型骨料级配设计方法，研究不同掺量下材料性能并建立响应面模型；总结施工工艺经验形成指南，跟踪检测验证，从力学、环境、成本和社会影响多维度综合评估材料应用效益。

3. 依托工程（依托工作）

研究成果将拟于项目依托榆林市 G242 绥德至清涧路面改造工程，本次路面改造 K802+780~K823+780 段起点位于绥德海洼沟，向南经田庄镇，于 K809+000 处进入清涧县，经石咀驿镇，终点位于清涧慕家河，全长 21.0 公里。在改造工程中计划铺筑试验路镁渣-水泥复合稳定碎石基层不低于 100m。

二、考核指标

1.预期目标

(1) 攻克镁渣晶体调控难题, 实现镁渣活性提升与膨胀控制, 开发出高效镁渣-水泥复合胶凝材料制备技术, 为低收缩抗裂基层材料提供性能优良的胶凝成分, 推动工业废渣在道路工程中的高值化利用。

(2) 形成镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料完整技术体系, 涵盖级配设计、性能评价、施工工艺及综合效益评估, 为道路基层建设提供绿色环保、经济可行的新方案, 提升道路工程可持续性。

2.主要技术经济指标 (具体的技术经济参数)

镁渣: 活性指数 ≥ 0.75 , $f\text{-MgO}$ 占 MgO 总量 $\leq 15\%$; 镁渣-水泥复合稳定水泥碎石: 7d 无侧限抗压强度 $\geq 5.5\text{Mpa}$, 干燥收缩值 $\leq 200 \times 10^{-6}$ 。活化镁渣较水泥成本降低 20%以上。

3.经济和社会效益

路面基层材料大量利用镁渣等固废材料, 可实现镁渣“变废为宝”, 活化镁渣较基层用水泥成本降低 20%以上。本项目研究成果一方面解决了镁渣造成的占地面积大、地下水污染和危害周边生态环境的问题, 另一方面将有效缓解陕西公路快速发展背景下带来的对水泥等胶凝材料供不应求、工程成本增高的难题, 同时, 大幅度提升路面基层的抗裂性及耐久性, 有效延长道路的使用寿命, 进而在道路的全生命周期内大幅降低维护成本及环境负荷, 对促进陕西省交通绿色发展和经济社会可持续发展具有重要意义。

4.成果提供形式

(1)《基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究》研究报告;

(2)《镁渣-水泥复合稳定碎石基层设计与施工技术指南》;

(3)发表论文 2 篇,其中提供不少于 1 篇与成果密切相关的《中文核心期刊要目总览》论文;

(4) 申请实用新型专利 2 项。

4. 其他考核指标

开展的媒体宣传报道不少于 3 次, 技术交流不少于 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026	第一季度：组建团队，收集资料，开展文献调研，明确各子课题研究方法与实验方案，采购物资。 第二季度：开展通风急冷对镁渣晶体结构影响的实验，同步进行“先磨后混”制备复合胶凝材料初步尝试。 第三季度：继续晶体结构实验，探究添加剂作用；研究不同镁渣对复合胶凝材料性能影响。 第四季度：测试镁渣特性，建立相关关系；初步构建强度和膨胀协同发展模型。发表文章 1 篇，申请专利 1 项。
2027	第一季度：提出晶体调控技术初步方案；完善协同发展模型与制备技术雏形。 第二季度：设计抗裂型骨料级配；研究复合胶凝材料掺量对力学性能影响。 第三季度：评价材料抗裂及循环性能；建立响应面模型，给出材料设计建议。发表文章 1 篇，申请专利 1 项。 第四季度：揭示性能提升机理；筹备施工试验段。
2028	第一季度：施工试验并总结工艺经验，形成指南。：检测试验路，计算环境与成本指标。整理成果，撰写结题报告，准备验收。

四、项目经费

项目总经费：60.0万元
 交通运输厅补助：19.8 万元
 自筹资金：40.2 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	60.0	17.8
1. 设备费	0.0	0.0
(1) 购置设备费	0.0	0.0
(2) 试制设备费	0.0	0.0
(3) 设备改造与租赁费	0.0	0.0
2. 业务费	37.0	14.8
(4) 材料支出	14.0	3.8
(5) 测试化验实验加工支出	12.0	3.0
(6) 燃料及动力支出	0.0	0.0
(7) 差旅支出	3.0	4.0
(8) 会议支出	2.0	1.0
(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	6.0	3.0
(11) 其他支出	0.0	0.0
3. 劳务费	17.0	3.0
(12) 劳务性支出	17.0	2.5
(13) 咨询专家支出	0.5	0.5
(二) 间接费用	6.0	2.0
4. 管理费	6.0	2.0
5. 绩效支出	0.0	0.0
合 计	60.0	19.8

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）	0
		（1）授权发明专利	0
		（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）	0
		（1）其中 SCI 索引收录数	1
		（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）	0
		（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	0
	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	0
		（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	0
		（4）新装备（装置）	0
		（5）平台/基地/示范点	0
		（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	0
		（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	0
		（1）博士、博士后	0
		（2）硕士	0
		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）	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）	0
效果类指标	经济效益	1. 新增产值（万元）	0
		2. 新增销售（万元）	0
		3. 新增出口创汇（万美元）	0
		4. 新增利润（万元）	0
	社会效益	1. 新增税收（万元）	0
		2. 新增就业人数	0
		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）	0
		6. 新增产业带动情况	0
		7. 技术集成示范（项）	0
		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

承担单位：长安大学

长安大学是教育部直属“211工程”及“双一流”建设高校，由三校合并而成，坐拥南北校区。作为交通、国土、城建领域的“黄埔军校”，其交通运输工程学科世界顶尖，深度参与港珠澳大桥等超级工程，是国家基础设施建设的战略脊梁。

参与单位：陕西省榆林市公路局

榆林市公路局是陕西省榆林市交通运输局下属的政府工作部门，主要负责国省干线公路建设、养护管理和路政执法，同时指导监管农村公路相关工作，具体涵盖养护计划编制、质量安全监管等职能。

参与单位：神木市泽川环境科技有限公司

环保工程的设计、施工及设备安装、调试；环保技术及环保工程咨询服务；环保设备的研发、销售；环境质量监测；污染源监测；建设项目环保竣工验收。

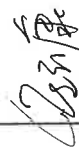
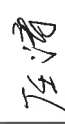
参与单位：中铁十七局第二工程有限公司

世界500强中国铁建下属国企，前身为铁道兵，总部西安。拥有矿山工程特级等多项一级资质，承建京沪高铁、鲁雷公路等国内外重难点工程，获鲁班奖、詹天佑奖等国家级殊荣。

参与单位：陕西铁路工程职业技术学院

陕西铁路工程职业技术学院是省属全日制公办高职院校，前身为1973年铁道部渭南铁路工程学校。现为国家“双高计划”高水平高职学校建设单位。

七、项目参加人员表

项目承担单位：长安大学						
参与单位（排序）：陕西省榆林市公路局，神木市泽川环境科技有限公司，中铁十七局第二工程有限公司，陕西铁路工程职业技术学院						
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	关博文	1985.01	长安大学	副教授	道路工程	项目负责人 
主要研究人员						
2	李少平	1975.03	陕西省榆林市公路局	高级工程师	公路与桥梁	技术指导 
3	谢涛	1974.07	陕西省榆林市环境工程评估中心	高级工程师	水资源与环 境工程	项目实施 
4	王云康	1981.03	陕西省榆林市生态环境局	工程师	环境科学	环境监测 
5	任涛	1985.05	中铁十七局第二工程有限公司	正高级工程师	公路工程	方案设计 

6	夏雨	1990.02	陕西铁路工程职业技术学院	讲师	道路工程	室内试验	夏雨
7	祁汉涛	1979.12	陕西省榆林市公路局	工程师	公路与桥梁	施工技术	祁汉涛
8	何欣易	1979.11	陕西省榆林市公路局	工程师	公路与桥梁	施工工艺	何欣易
9	朱建勋	1977.01	陕西省榆林市公路局	助理工程师	交通土建工程	质量监督	朱建勋
10	马小鹏	1979.12	陕西省榆林市公路局	高级工程师	公路与桥梁	质量监督	马小鹏
11	刘伟	1987.12	陕西省榆林市公路局	工程师	交通运输	室内试验	刘伟
12	陈慧娴	1980.07	陕西省榆林市公路局	工程师	公路工程	室内试验	陈慧娴
13	齐贺停	1976.07	神木市泽川环境科技有限公司	工程师	水利工程	室内试验	齐贺停
14	常安	1981.08	榆林路桥建筑工程公司	工程师	公路工程	室内试验	常安
15	郭艳	1980.06	榆林市兴达建安有限责任公司	工程师	公路工程	工程验证	郭艳
16	曹轩豪	2001.09	长安大学	/	道路材料	室内试验	曹轩豪

八、信息表

项目合同编号		25-81K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部	
项目名称		基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究							
项目实施所在地		陕西		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月			
总 经 费		60.0 万		厅 拨		19.8 万			
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	610113	
	通讯地址	陕西省西安市南二环中段					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	陕西省榆林市公路局							
	2	神木市泽川环境科技有限公司							
	3	中铁十七局第二工程有限公司,							
	4	陕西铁路工程职业技术学院							
项目负责人	姓 名	关博文		性 别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1985	
	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	15399069835 029-82334849			电子邮箱		buan@chd.edu.cn		
项目联系人	姓名	曹轩豪			性 别		男		
	联系电话	13239143308 029-82334849			电子邮箱		caoxh@chd.edu.cn		
项目组人数	16	高级	5	中级	9	初级	1	其他	1
主要研究内容 (100 字以内)	研究镁渣晶体调控提升活性控膨胀, 开发“先磨后混”胶凝材料强度-膨胀协同技术, 设计抗裂型基层级配并揭示机理, 形成施工指南, 综合评价环境、成本及社会效益。								
成果属性	A	A: 新技术 B: 新工艺 C: 新材料 D: 新产品 E: 软科学 F: 装备 G: 其他							
成果形式	A	A: 专著、论文 B: 样机、样品 C: 试验工程、产品 D: 示范工程 E: 产品 F: 其他							

九、共同条款

合同各方应共同遵守《陕西省交通运输厅科研项目管理办法》。

1.合同执行过程中，乙方如需修改合同某项条款，应向甲方提出变更内容及理由的申请报告，经甲方审核同意后实施。未接到正式批准以前，双方仍须按原合同条款履行，否则后果由自行修改条款的一方负责。

2.乙方因任何主观或客观原因（如：与大纲评审内容有出入，挪用经费、技术措施或某种条件不落实等）致使计划无法执行而要求解除合同的，需取得甲方书面同意且应视不同情况，部分或全部退还所拨经费；出现上述情况的，甲方有权单方解除本合同且视不同情况要求乙方部分或全部退还所拨经费。

3.乙方的厅补助经费及自筹经费应按国省有关科研经费使用范围开支。

4.项目执行过程中，甲方提出变更合同有关内容时，要与乙方协商达成书面协议。

5.项目完成后，乙方必须按要求向甲方提交一套真实、完整、详细的技术资料及样机，并提出项目验收申请报告，由甲方审查后组织验收。

6.合同正本一式捌份，甲方单位伍份，承担单位叁份。

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4月7日

联系人：（签字）

张昭

（公章）

电 话：029-88869067

合同乙方：（承担单位）



单位负责人：（签字）

科研项目专用章

2026年4月7日

项目负责人：（签字）

科研项目专用章

（公章）

电 话：029-82338114

2026年04月07日

财务负责人：（签字）

师艺辰

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：  

2026 年 4 月 6 日

项目编号：25-81K

2025年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称：基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究

申请单位：长安大学（盖章）

联系人：关博文

电话：15399069835

陕西省交通运输厅制

2025年12月

目 录

一、 项目研究的背景和必要性	1
二、 前期科研及工作基础	5
三、 实施方案	20
四、 项目承担单位及参加单位概况	29
1. 单位概况	29
2. 技术力量及人员构成	31
3. 各自承担的主要工作	31
4. 项目主要负责人情况	32
五、 项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	32
六、 项目经费估算及资金筹措情况	34
经费测算说明	35
1. 业务费	35
3. 劳务费	37
4. 间接费用	37
七、 项目绩效指标	38
八、 预期目标、成果提供形式及经济社会效益	40
1. 项目预期目标（项目的考核目标）	40
2. 提交的研究成果及其形式	40
3. 经济、社会、环境效益分析	40
九、 其它需要说明的问题	41
十、 申请单位意见	41

一、项目研究的背景和必要性

“碳达峰、碳中和”是党中央经过深思熟虑做出的重大战略决策，能源的绿色低碳发展是实现“双碳”目标的关键。2021年2月国务院印发《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》。《指导意见》提出，建立健全绿色低碳循环发展经济体系，促进经济社会发展全面绿色转型，是解决我国资源环境生态问题的基础之策。交通运输部为践行绿色交通、推进交通建设发展，发布了《关于全面深入推进绿色交通发展的意见》。2021年11月，陕西省人民政府印发《加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系若干措施的通知》。2023年5月，习近平总书记在听取陕西省委和省政府工作汇报时指出：“要着力推动发展方式绿色低碳转型，提升生态文明建设水平。”2024年1月陕西省省长赵刚作政府工作报告指出，陕西要推动发展方式绿色低碳转型，深化建材重点行业领域节能降碳，构建废弃物循环利用体系。

近年来，陕西在聚力发展传统支柱产业的同时，大力发展在装备制造业领域市场广阔的金属镁产业。陕西榆林神府地区是全球最大的金属镁生产基地，神府两县共有金属镁企业43家，其中府谷34家，神木9家。中国原镁产量达102.2万吨，其中神府共生产原镁量达50.23万吨，占全国年产量的50%，占全球年产量的40%，见图1.1。

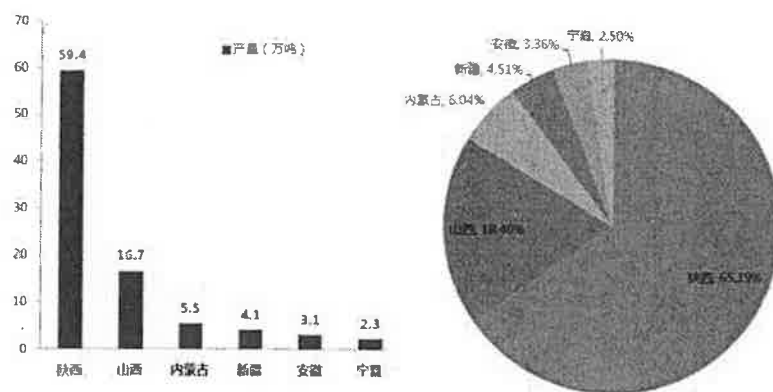


图 1.1 中国镁产量分布

陕西榆林已成全国最大、全球重要的原镁产地，被誉为“世界镁都”。目前，镁生产以皮江法为主，每使用皮江法生产 1 吨金属镁就会产生 5~10 吨的还原渣，每年产生至少 300~500 万吨镁渣，这些还原渣目前只有少部分进行回收利用，大部分镁渣填埋于沟壑或地表堆存，用地成本增加的同时对环境也会产生负面影响（图 1.2 和图 1.3）。2024 年 4 月陕西省发展与改革委员会印发《陕西省培育千亿级铝镁轻质材料产业创新集群行动计划》，将力争到 2030 年建成全球最大镁基材料产业创新集群。然而，镁渣作为陕西镁产业冶炼过程中的主要副产品，其大量堆积不仅占用了土地资源，增加了环境处理成本，还限制了镁资源的有效循环利用，从而成为制约陕西镁产业升级和提升经济效益的重要因素。

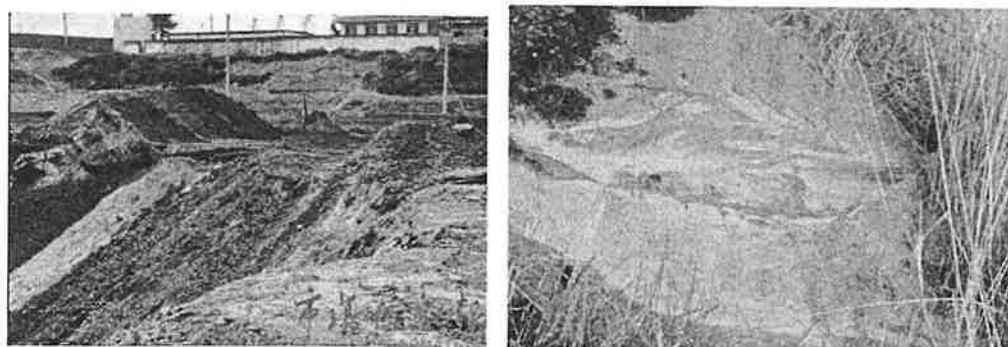


图 1.2 镁渣堆存污染环境

陕西府谷县众鑫公司环境污染为何久治不愈?



2022年2月21日 府谷众鑫公司的另一问题是煤灰、煤渣。煤灰煤渣等固废污染环境,对人体、土壤都有较大危害。按照环保要求,金属镁生产企业煤渣煤灰等固废必须在指定地点覆土填埋不得裸露地表。

微博

吴堡县人民政府 中共榆林市委 榆林市人民政府关于中央第...

2021年12月15日 榆林市府谷县大昌汗镇石窑塔村榆林郭家湾煤矿采煤导致地面塌陷,地面上存放的102立方米煤渣进入地下,污染了地下水和土壤。另外,地面产生裂缝,地下有害气体散发。

吴堡县人民政府

陕西神木:企业污染何时止?

2017年5月8日 (注:煤渣在镁工业中属于废品,煤渣为粉尘物,悬浮在空气中很难沉降,在自然环境中极易形成粉尘污染并具有很强的吸湿性,易使土壤酸化,造成土壤板结,堆积过煤渣的土...

搜狐网

图 1.3 镁渣随意排放引发污染相关报道

镁渣是生产金属镁时排出的工业废渣,其主要化学成分为 CaO 、 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 等,与水泥熟料成分相似,且镁渣的生成温度在 $1100\sim 1200^\circ\text{C}$,其内部矿物是属于介稳的高温型结构,表明镁渣自身具有一定的潜在活性。硅酸盐水泥是国民经济建设的基础原材料,广泛应用于国家交通基础设施建设,特别是路面基层建设过程中广泛采用水泥稳定碎石材料。由于传统硅酸盐水泥的生产需要消耗大量能源和不可再生资源,同时排放出大量温室气体,破坏地球生态系统,加剧环境污染问题。据计算,每生产 1 吨水泥约排放出 0.8 吨 CO_2 ,水泥生产过程中产生的 CO_2 约占全球温室气体排放量的 8%。近年来,由于煤炭资源日益稀缺,水泥的生产成本进一步增加。在全球气候变化和温室效应加剧的背景下,减少水泥的使用量和开发可替代材料成为应对环境问题的关键。虽然高温生成的镁渣具有一定的潜在活性,但常用出炉镁渣采取自然冷却的方式,形成的活性极低的 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 含量较多,活性较高的 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ 含量较少,导致镁渣料难以满足掺合料活性要求。我国的高速公路沥青混凝土路面普遍采用半刚性基层,水泥稳定碎石是较为常见的一种半刚性路面的基层材料,调研发现大量水泥

稳定碎石基层存在开裂的情况，重要致因之一为：传统硅酸盐水泥在凝结硬化过程中，由于水化反应、温度变化等因素，往往会产生体积收缩。这种收缩如果得不到有效补偿，就会在材料内部产生拉应力，当拉应力超过材料的抗拉强度时，就会导致裂缝的产生，此类开裂不仅损害了基层结构的完整性，还可能加速路面损坏，影响道路的使用寿命和行车安全。镁渣的主要成分中具有水化膨胀性质的有 MgO 和 CaO ，生成的水化产物为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，水化后的体积膨胀分别达到 148% 和 97.9%，镁渣中的有效组分发生水化后会产生一定的膨胀效果，在水泥稳定碎石硬化过程中产生一定的限制膨胀，从而有效补偿水泥硬化过程中的收缩（主要包括干缩和温缩）。这一过程不仅改善了材料的内部应力状态，提高了其抗裂能力。然而，镁渣中还含有大量的 f-MgO 限制其在道路工程中的大规模应用。 f-MgO 在硬化后水化速度非常慢，甚至可以持续几年，形成氢氧化镁时体积膨胀，导致混凝土或基层内部产生应力，超过材料的抗拉强度时就会发生开裂，导致道路结构发生破坏。综上所述，原生镁渣材料活性不足并且伴随着大量游离氧化镁（ f-MgO ）所引起的滞后膨胀现象是限制镁渣作为矿物掺合料在道路工程领域广泛应用的关键因素。

鉴于此，本项目通过急冷与离子替换等晶体调控技术实现镁渣活性提升与膨胀控制；基于不同细度和掺配比例镁渣与水泥熟料优化配伍，提出基于强度-膨胀协同的镁渣-水泥复合胶凝体系制备技术，揭示镁渣-水泥复合胶凝材料补偿收缩效应机理；基于贝雷法与主骨料空隙填充法，提出间断级配的抗裂型骨料级配设计，结合镁渣-水泥

复合胶凝材料与力学性能、抗裂性能以及水稳定性能关系构建,提出低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料设计方法;依托示范工程,研究低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料施工制备、现场拌合、摊铺和压实等的施工工艺,形成技术指南;基于性能、环境、成本和社会影响,综合评价镁渣-水泥复合稳定碎石基层从“摇篮到坟墓”全生命周期效益。

本项目的研究成果将实现大宗工业固废-镁渣高质量应用于道路工程,不仅显著减轻镁渣堆积对生态环境造成的负面效应,而且降低了路面基层建设过程中对传统水泥材料的依赖程度,有助于削减碳排放量,推动资源的高效循环与再利用。同时研究成果的应用还能显著提升路面基层的抗裂性及耐久性,有效延长道路的使用寿命,进而在道路的全生命周期内大幅降低维护成本及环境负荷。这一创新实践对于促进绿色交通基础设施的构建与升级,以及支撑陕西省新质生产力的可持续发展战略,具有重要的价值与意义。

二、前期科研及工作基础

1.国内外研究现状

(1) 镁渣特性及活性激发技术研究现状

目前,我国在生产原镁的过程中,通常使用热还原法,也被称为皮江法。以金川镁业公司的生产工艺为例,皮江法具体工艺流程如下:首先将合格粒径(5-20mm)的白云石放入回转窑内进行煅烧(1300℃),反应过程如反应式(1),再将煅烧后的白云石和硅铁磨成粉末,接着加入萤石粉,三者按比例混合均匀,干粉高压成球后(150-200MPa),

将球团放入还原罐中加热生成镁蒸汽 (1300℃), 还原罐内的反应过程如反应式 (2)。镁蒸汽冷却后, 结晶生成粗镁, 完成粗镁提取后, 将残存的镁渣通过扒渣机扒至料斗车, 冷却后运送至料场填埋。

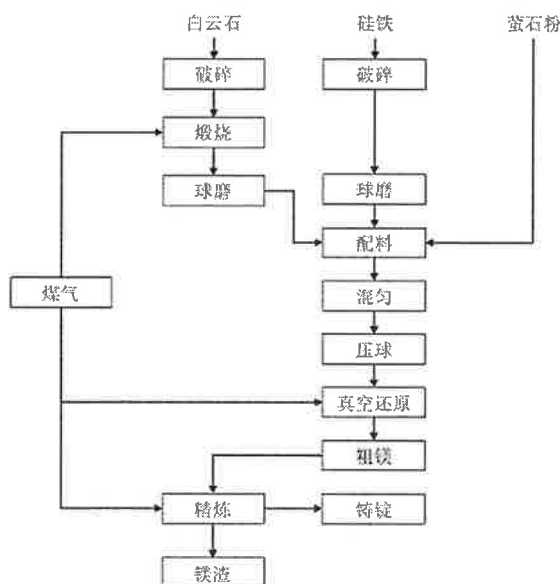
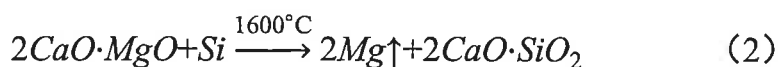
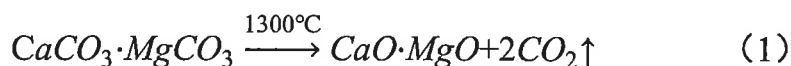


图 2.1 金属镁提炼工艺流程图

镁渣是一种高碱性灰白色粉末, 其矿物成分主要包含 γ - C_2S 、 β - C_2S 、 MgO 、 CaO 。镁渣中以 C_2S 为主, C_2S 有4种晶型, 各种晶型会在不同温度下转变并伴有一些体积上的变化。 C_2S 在2130℃左右呈 α 型, 1420℃时为 α' 型, 温度降至675℃转变为 β 型, 降至300~400℃时 β - C_2S 转变为 γ - C_2S , 镁渣结构粉化, 水化活性下降, 严重制约其规模化利用。在皮江法提炼粗镁时, 还原反应在还原罐内难以完全进行, 导致镁渣中含有大量未被还原的游离 MgO 。在硅酸盐水泥组成中, 氧化镁遇水会发生缓慢水化并产生一定膨胀, 同时游离氧化镁的存在, 使水泥的安定性变差, 从而影响了混凝土的整体稳定性, 导致混凝土

结构物内部体积扩张,使其产生裂缝和损伤。

针对镁渣活性不足等问题,国内外研究学者主要通过与矿物掺合料复配、机械粉磨、碱激发等方式提升其活性。崔自治等通过对镁渣的化学组成,水泥胶砂强度试验和微观结构分析,研究了镁渣的火山灰活性,细磨加工效应和与粉煤灰的复合效应机理[1]。罗立涛等以镁渣、水泥和脱硫石膏为主要原料,设计和配制复合胶凝材料,试验结果表明,脱硫石膏对镁渣-水泥胶凝体系起到了活性激发作用[2]。徐明刚等将镁渣(MS)和粉煤灰(FA)回收作为胶凝材料,制成一种可用于采矿工程中的膏体充填材料[3]。采用改性镁渣(MMS)与粉煤灰(FA)复掺制备矿山充填胶凝材料(MSCM)替代硅酸盐水泥,研究表明掺加FA对MSCM的水化具有显著影响,可有效缩短MSCM在水化加速阶段的反应时间,提高整体水化反应速率[4]。孙睿通过探究超细镁渣微粉-水泥复合胶凝材料(MS-C)新拌浆体和硬化浆体的性能、组成及结构演化规律,分析超细镁渣微粉对MS-C水化进程的影响机制,进一步揭示镁渣-水泥的协同水化机理[5]。路广军等以炼镁企业排放自冷渣为原料,采用单一和复合碱激发方式对镁渣进行处理,制备碱激发镁渣胶凝材料[6]。Ruan等人通过在金属镁还原前加入优化剂,得到改性镁渣(MMS)的28d活性指数较未处理镁渣提高了20.72%,其早期水化反应更为迅速并具有良好的环境稳定性[7]。Li等人研究发现经过酸性介质处理的镁渣颗粒表面特性可以提高其水化性能。与未掺入MS的水泥相比,酸改性的MS水泥28天抗压强度提高了22.56%。有机酸对MS的有效修饰是由于MS的比表

面积的显著增加和 MS 表面羧基与 Ca^{2+} 的结合[8]。此外, 通过利用硅酸钠($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$)作为潜在胶凝材料的附加活化剂, Yang 等人研究发现制备的镁渣基胶凝材料充填体的有效孔径减小, 有害孔隙减少归因于其结构中的 AFt 晶体具有更强的弹性, 骨料与凝胶的交叉结合使骨料能够填充充填体孔隙, 从而提高了其强度[9]。出于镁渣的低水化活性的原因, Wu 等人利用一系列“浸出-碳酸化”的方法将镁渣(MS)滤液进行碳酸化得到了高纯度球形水晶石碳酸钙(VCC)和浸出的富含无定形硅胶的固体渣(LSR), 改善了水泥浆体的累积放热并细化孔径分布[10]。

(2) 膨胀水泥稳定基层提升抗裂性能研究现状

水泥由于化学收缩、塑性收缩、温度收缩、干燥收缩以及自收缩等, 极易产生收缩开裂现象, 进而影响水泥基材料的力学性能以及耐久性能。纵观国内外水泥稳定碎石应用现状, 由于水泥收缩开裂引发的耐久性问题比比皆是。

目前国内外常采用膨胀剂或膨胀水泥是减少水泥混凝土收缩开裂, 其原理是指在水泥水化硬化过程中生成膨胀型水化产物, 以补偿其收缩 (如图 2.2a 所示)。虽然膨胀水泥自身也会发生收缩, 但是由于其早期形成一定的膨胀抵消了后期的收缩, 使得其最终的净收缩率大大降低。在约束限制条件下, 早期形成的膨胀导致压应力的发展, 这抵消了由于收缩产生的拉应力, 变相的提高了水泥基材料的抗拉强度, 从而提高了水泥基材料的抗裂性能 (如图 2.2b 所示)。此外, 膨胀产物的形成可以填充细化孔隙, 优化水泥浆体孔结构, 使得水泥基

材料抗渗性大大提升。目前, MgO 作为膨胀剂已广泛应用于提升混凝土抗裂性能。2017 年中国混凝土与水泥制品协会发布《混凝土用氧化镁膨胀剂》(T/CCPA 5-2017), 2018 年中国工程建设标准化协会标准发布《混凝土用氧化镁膨胀剂应用技术规程》(TCECS 540-2018)。

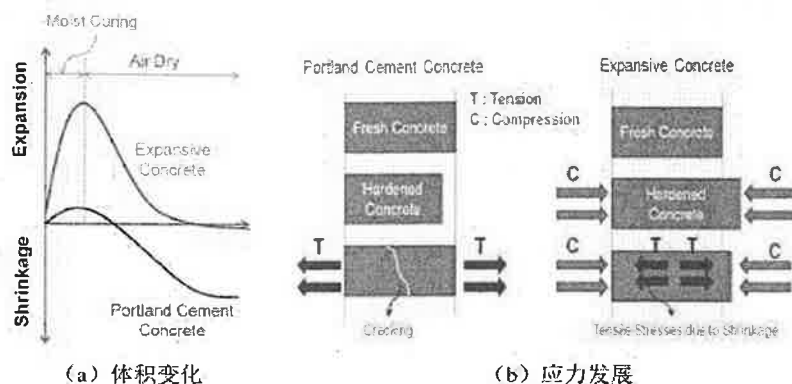


图 2.2 膨胀水泥补偿收缩原理示意图

水泥稳定基层虽然在材料组成、结构等方面与水泥混凝土存在较大差异, 具体表现为: ①水泥用量不同, 水泥稳定基层中水泥剂量仅占 5% 左右, 而在混凝土中其含量则达到 13% 以上; ②材料致密程度不同, 混凝土由于胶材用量大, 浆体存在明显富余, 可以很好的包裹粗骨料, 因而其具有较好的工作性, 一般采用浇筑成型, 浆体即可很好的填充在骨料中, 常规混凝土含气量仅有 2% 左右; 而水泥稳定基层基本不存在工作性, 因而成型时必须采用碾压成型, 往往存在较大空隙。但从根本上, 水泥稳定基层依然属于水泥基材料范畴, 其收缩开裂很大程度上是由于水泥收缩导致。因此, 解决水泥自身收缩问题可以极大提升水泥稳定基层抗裂性能。为了补偿稳定后基层的收缩, Li 等人设计了缓凝微膨胀水泥作为基层粘结剂 (RBCB: 粉煤灰掺量为 45%, 硅酸盐水泥熟料掺量为 45%, 石膏掺量为 10%), 结果表明 RBCB

的 28 天膨胀率为 4‰, 在干湿和干湿两种情况下均有补偿水泥收缩和提高体积稳定性的作用[11]。Yan 等人研究发现干燥收缩的主要控制因素随混合料内相对湿度的变化而变化。相对湿度较大时, 毛细拉应力是影响干燥收缩的主要因素。在中等相对湿度水平下, 凝胶颗粒外层水膜的表面张力成为导致混合物收缩的主要因素[12]。在较低的相对湿度下, 层间水分的损失成为收缩的主要驱动力[13]。Wang 等人研究发现快速再生水泥稳定碎石中水泥水化产生的膨胀硫铝酸盐和氯铝酸盐以及 ZSP 中的氧化钙等水化产物抑制了早期干缩开裂[14]。目前, 已有研究学者对掺膨胀组分补偿收缩提升水泥稳定碎石基层抗裂性能。刘汉云飞、马士宾、李欢等研究了复掺脱硫灰膨胀剂、钙矾石类膨胀剂、U 型膨胀剂等不同种类膨胀剂及掺量对温缩性能及干缩性能的影响, 确定了适用于抗裂水泥稳定碎石基层材料膨胀剂合理用量[15-20]。此外, Chen 等人对不同 SO_3 掺量水泥-FA 稳定碎石的抗缩抗裂性能进行了研究, 探讨了微膨胀补偿路面基层的收缩机理。结果表明, 当掺量为 10% FA 时, 最佳 SO_3 掺量可提高水泥和 FA 稳定碎石的抗缩抗裂性能[21]。Ye 等人将纳米 MgO 和轻烧 MgO 作为补偿收缩组分添加到硅酸盐水泥和矿渣混合的膏体中, 以补偿大体积混凝土的收缩。结果表明纳米镁石基比轻烧镁石基具有更高的抗压强度和更小的膨胀率, 这归因于纳米镁石基能更有效地填充均匀分布的水镁石孔隙[22]。

(3) 工业废渣稳定碎石基层研究进展

朱子龙等利用生活垃圾焚烧灰渣制备一种骨料嵌锁型的路面基

层,优化了各集料的最优配合比,并对骨料嵌锁型垃圾焚烧灰渣路面基层材料的体积稳定性、力学性能、SEM 微观结构以及环境影响进行了研究[23]。张先伟等采用电解锰渣和城市生活垃圾焚烧底渣制备一种路面基层材料(RBM),并研究以不同 Ca/Si 比(质量比)制备的 RBM 的力学性能与耐久性[24]。刘族东设计水泥类稳定磷尾矿-废石和工业废渣类综合稳定磷尾矿-废石路面基层材料,通过节省停车场路面基层填筑材料成本对比,评价了直接经济效益[25]。Li 利用热填充老化渣采用振动压实法制备了水泥稳定大钢渣混合料(CSLS)。结果表明钢渣的矿物组成中具有水化活性的成分较低,因此水泥掺量的变化对强度的形成和生长起至关重要的作用。水泥掺量从 4.0%增加到 6.0%导致两种结构类型的混合料 7d 的平均 UCS 增加 25.9%[26]。Jing 研究发现过量的磷石膏(PG)阻碍水泥水化,导致无侧限抗压强度、劈裂强度和回弹模量略有下降,而温度收缩应变略有增加[27]。适量的 PG 可使羟基云母带来的铝离子在强碱环境中溶解,形成钙矾石,并与水泥中的钙、铝离子、硫酸盐、PG 中的钙离子一起形成,这些成分的形成可减少干收缩应变,有效抑制反射裂缝的形成[28]。Chen 制备了水泥稳定钢渣并与水泥稳定碎石对比评价发现,水泥稳定钢渣在龄期 7 d、14 d 和 28 d 时的抗压强度分别提高了 15.4%、22.0%和 23.7%。由于水化和火山灰作用,水泥稳定钢渣界面过渡区 C-S-H 含量较高, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 Aft 含量较低。随着养护时间的延长,水泥稳定钢渣的吸附孔隙率增大,而渗透孔和迁移孔数量明显减少[29]。此外,Zhao 等人利用工业固体废物生产了可持续的缓凝微膨胀道路基

层粘结剂(RBCB)。研究表明, RBCB 具备一定的缓凝作用避免因快速硬化造成的强度损失。在熟料 40%、FA 35%、PG 15%、SS 10% 条件下发现较高含量的 PG 较好地刺激了粉煤灰(FA)的火山灰活性, 并通过抑制后期水化阶段 AFt 向 AFm 的转化更有效地补偿了收缩 [30]。

(4) 现有研究中存在问题:

① 镁渣活性普遍较低, 极大地限制了镁渣的资源化应用。到目前为止, 对镁渣的反应活性缺乏系统性探究, 特别是镁渣的活性与内部晶体特性之间的联系还不明确, 仅从矿物掺合料复配使用难以达到通过提高自身活性实现大掺量应用目标。

② 镁渣中 f-MgO 含量较高, f-MgO 的溶胀性可能会引起水泥基材料的开裂, 限制了其在道路工程领域的规模化应用。目前, 关于镁渣中具备不同晶体特性的 MgO 的活性行为、反应机理, 以及它们对水泥基材料长期体积稳定性和耐久性能的具体影响鲜有研究, 提升其抗裂性能也是采用添加纤维等外掺组分, 难以根本解决其膨胀开裂问题。

③ MgO 膨胀剂的研究主要集中在混凝土领域, 水泥稳定碎石基层材料中应用主要集中为 AFt 型膨胀剂, 含有 MgO 膨胀组分的镁渣, 其晶体特征、水化历程与引发宏观膨胀现象之间的关联性, 目前尚待进一步阐明, 镁渣-水泥复合胶凝材料补偿收缩效应机理有待探究。

④ 目前对于固体废弃物制备胶凝材料 (钢渣微粉、磷石膏、锰渣等) 稳定碎石基层开展研究, 但不同固废胶凝材料成分不同性能差

异性较大，难以镁渣-水泥复合稳定碎石基层设计与施工难以直接套用已有方法。

⑤传统评价方法忽视在工业固体废物基胶凝材料制备过程中高能耗、高排放的阶段的问题，难以实现镁渣从“摇篮到坟墓”的生命周期阶段综合效益评价。

2.项目前期科研及现有工作条件

(1) 现有技术和工作进展

项目组主要研究人员长期从事固体废物再生利用以及道路工程材料的耐久性研究。截至目前，项目申请人依托自筹资金渠道，持续且深入地推进该领域相关研究工作。2024 年 6 月，在榆林市中大修工程中成功铺筑了采用镁渣水泥复合稳定碎石的路面基层试验段（图 2.3），为后续研究积累了宝贵的实践数据与经验。研究结果表明，镁渣呈现出一定的胶凝活性，具备部分替代水泥的潜力，在提升路面基层抗裂性能方面亦展现出积极效应，这为开发新型环保筑路材料提供了新的思路与方向。然而，在实际工程应用进程中，仍暴露出若干亟待攻克的关键问题：其一，受限于镁渣自身活性欠佳，在混合料配制时，其掺量被限制在较低水平（0-10%），难以充分挖掘并释放其潜在优势，进而影响材料性能的充分发挥；其二，镁渣中富含大量游离氧化镁（f-MgO），该成分的存在对基层抗裂性能产生了显著的负面影响，成为制约镁渣大规模工程应用的关键因素。鉴于上述问题对镁渣在路面基层材料中推广应用的严重阻碍，为深入探究有效解决方案，优化镁渣水泥复合稳定碎石材料性能，推动其在道路工程领域的

广泛应用，特申请开展本项目。

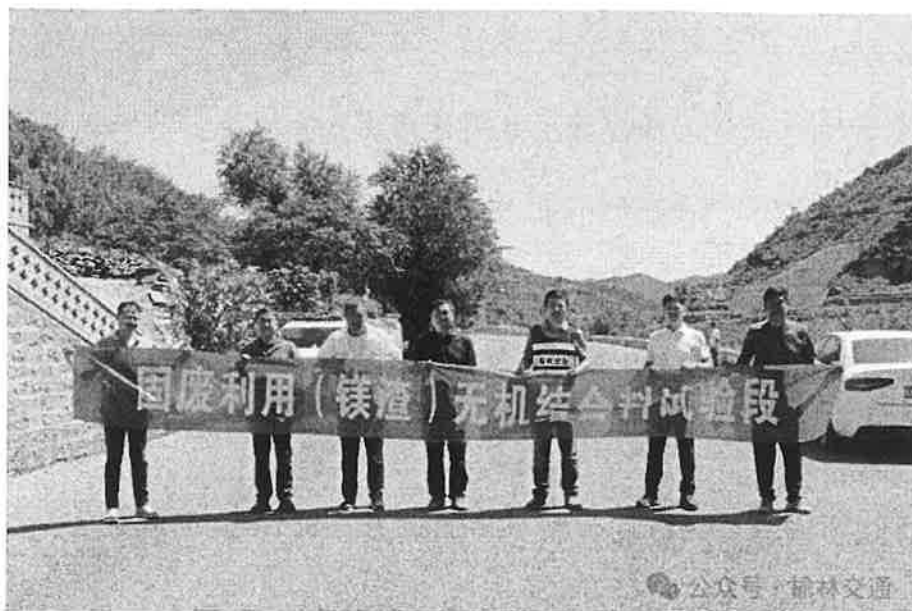


图 2.3 镁渣路面基层初步应用

申请人主编地方标准《镁渣资源化利用技术规范》(DB6108/T115-2025)已于2025年5月2日实施(图2.4)。这为本项目的实施提供了坚实的标准化支撑。同时本项目成果将用于该标准的进一步修订。本项目研发形成的创新性成果将通过标准化技术委员会,反向输入至该地方标准的修订工作,形成"技术研发-标准修订-成果反哺"的互动机制,持续完善区域大宗固废-镁渣的资源化利用标准。

榆 林 市 地 方 标 准

DB6100/T 115—2029

1 液壓

本文档规定了快速定量比对的总体原则, 以及所需的基础材料、试剂土和砂浆中的应用标准, 本文档适用于混凝土的强度检测。

2 膽固醇和脂蛋白

下列文件中的内容通过文中的标注引用增加进本文必不可少的条款,其中,带日期的引用文件,在标注日期对应的版本适用于本文件;不带日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- | | | |
|-----|-------|--------------------------|
| 42 | 16327 | 大气污染控制与治理技术 |
| 43 | 52623 | 环境地质学 |
| 44 | 25161 | 环境化学 |
| 45 | 36860 | 环境微生物学 资源环境与污染控制微生物学(双修) |
| 46 | 52114 | 环境生态学 |
| 47 | 50292 | 环境材料工程与工程材料 |
| 48 | 50298 | 资源环境工程与工程材料 |
| 49 | 53022 | 环境与工程工程材料 |
| 50 | 2010 | 环境资源与工程材料 |
| 51 | 220 | 环境资源与工程材料 |
| 52 | 223 | 环境资源与工程材料 |
| 53 | 241 | 环境资源与工程材料 |
| 54 | 2520 | 环境资源与工程材料 |
| 55 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 56 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 57 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 58 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 59 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 60 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 61 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 62 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 63 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 64 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 65 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 66 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 67 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 68 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 69 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 70 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 71 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 72 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 73 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 74 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 75 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 76 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 77 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 78 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 79 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 80 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 81 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 82 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 83 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 84 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 85 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 86 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 87 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 88 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 89 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 90 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 91 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 92 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 93 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 94 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 95 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 96 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 97 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 98 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 99 | 2620 | 环境资源与工程材料 |
| 100 | 2620 | 环境资源与工程材料 |

3 术语和定义

下列各题均按原文意思回答。

31

力能金属矿床产生的以硫酸盐矿物为主要成分的工业废物。

12

水質穩定試驗

2025-04-02 发布

2025-05-02 星期四

榆林市市场监督管理局 发布

申请人目前正主持承担江西省交通运输厅重大科技专项，该项目聚焦锂资源提取过程中产生的长石粉、锂渣等典型固废，创新性提出基于镁渣基胶凝材料的协同固化锂渣、长石粉技术路线，实现提锂固废在道路基层工程的规模消纳与高值利用。相关成果已发表于国际权威期刊《Journal of Cleaner Production》(IF=9.7, 中科院一区 TOP 期刊)和《Construction and Building Materials》(IF=8.0, 中科院一区 TOP 期刊)，见图 13。

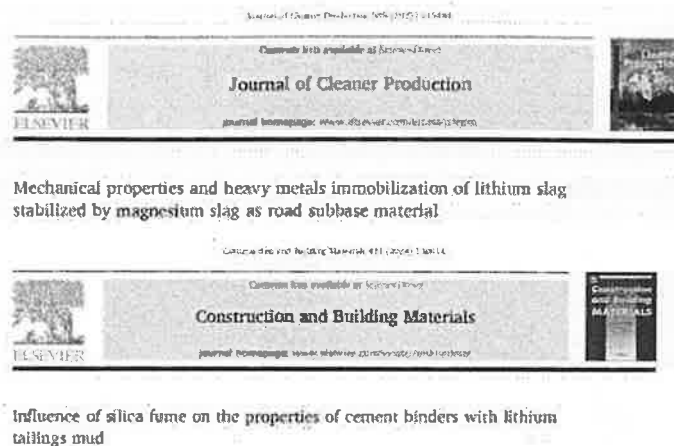


图 2.5 国际权威期刊发表文章

该研究成果成功破解了江西省锂电产业发展中固废处置容量不足的技术瓶颈，为区域战略性新兴产业绿色转型提供了关键技术支撑。项目进展受到中国工程院院士等业内顶尖专家的高度评价，相关成果被《新华网》、《凤凰网》、《宜春日报》等主流媒体专题报道（如图 2.6 和图 2.7 所示），产生了显著的学术影响与社会效益。上述研究成果为本项目的实施提供理论与技术支撑。



图 2.6 固体废弃物道路工程应用研究成果被周创兵院士引用



图 2.7 项目成果受新华网等国内知名媒体报道

2、必要支撑条件

在实验条件方面，项目承担单位拥有“长安大学公路工程教育部重点实验室”等科研平台。依托平台在工程材料宏观力学性能测试和分析、耐久性测试和分析等方面具有较强的实力，可承担胶凝材料、半刚性基层材料等道路建筑材料的物理力学性能实验，拥有环境扫描电子显微镜(ESEM)、X 射线衍射仪(XRD)、电子万能试验机(MTS)、显微硬度分析仪、大型环境模拟试验仓等大量精密仪器，可满足项目所需的试验需求。研究过程中所需的部分试验仪器，如图 11-16 所示。这将为本项目全面试验与理论研究工作提供良好的硬件条件。

在科研合作方面，申报人与美国印第安纳州 INDOT R&D、普渡大学(Purdue University)自 2010 年起保持良好地交流与合作，曾在固废再生利用等领域进行多次项目合作，项目取得丰硕的研究成果。同时，申请人在访学普渡大学期间对矿渣在道路工程中应用项目开展了联合攻关。这都将为本项目的实施提供良好的合作及试验研究基础。



图 2.8(a) 场发射扫描电子显微镜

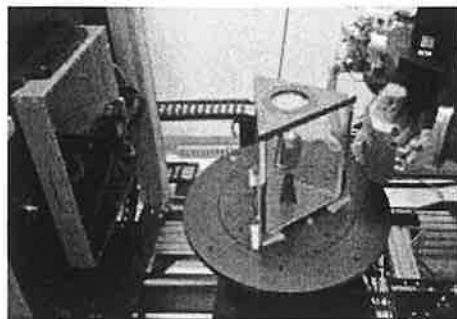


图 2.8(b) X- CT 扫描仪

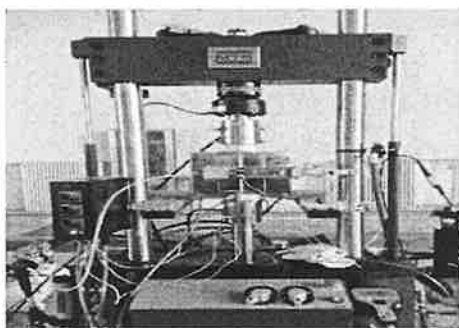


图 2.8(c) MTS 测试系统

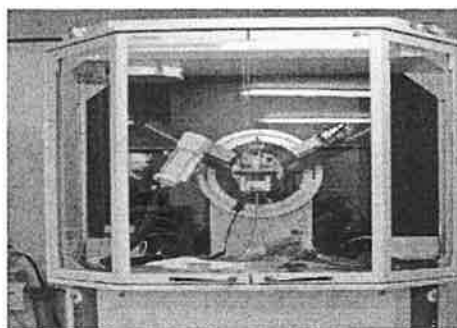


图 2.8(d) X 射线衍射仪

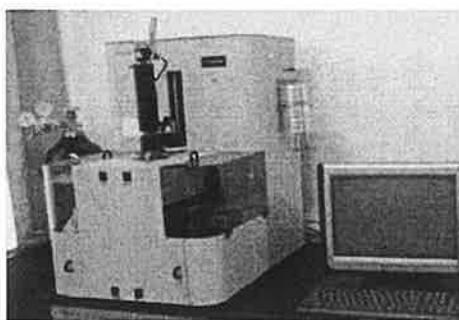


图 2.8(e) 压汞仪

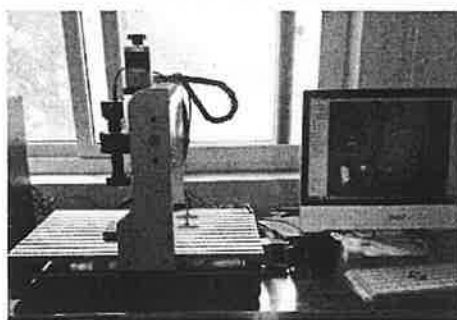


图 2.8(f) 气孔结构分析仪

3.参考文献

- [1] 崔自治,杨维武,张冬平.镁渣火山灰活性试验研究[J].宁夏工程技术,2007,(02):160-163.
- [2] 罗立涛,冯启明,黄阳,等.基于镁渣-水泥-脱硫石膏复合胶凝材料的砌筑砂浆制备及其性能[J].化工矿物与加工,2024,53(08):17-22.
- [3] 徐明刚,刘立国.改性镁渣基充填材料的性能评价及其孔结构演变规律研究[J].金属矿山,2023,(11):186-190.
- [4] 孙伟吉,刘浪,徐龙华,等.改性镁渣基矿用复合胶凝材料的水化性能[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):4057-4070.
- [5] 孙睿,邬兆杰,王栋民,等.超细镁渣微粉-水泥复合胶凝材料的性能及水化机理[J].材料导报,2023,37(09):98-108.

- [6] 路广军,韩晋钢,马志斌.碱激发镁渣胶凝特性实验设计[J].实验技术与管理,2022,39(09):31-36+47.
- [7] S.S. Ruan, L. Liu, C.C. Shao, et al. Study on the source of activity and differences between modified and unmodified magnesium slag as a filling cementitious material. *Construction and Building Materials*. 2023, 392, 132019.
- [8] X. Li, R. Sun, D.M. Wang, et al. Insights into the acid-modification on magnesium slag and its effects on cement-magnesium slag composite cementitious material. *Construction and Building Materials*, 2024, 449, 138445.
- [9] X.B Yang, J Yang, S.H. Yin, et al. Cementation characteristics and hydration mechanism of magnesium slag-phosphogypsum composite cementitious materials. *Materials Today Communications*, 2024, 41, 110547.
- [10] F.S. Wu, J. Qin, Y. Cao, et al. Effects of vaterite and leachate solid residue prepared from magnesium slag on the performance of cement mortar. *Construction and Building Materials*, 2024, 429, 136409.
- [11] J.W. Li, W.G. Shen, B.L. Zhang, et al. Investigation on the preparation and performance of clinker-fly ash-gypsum road base course binder. *Construction and Building Materials*, 2019, 212, 39-48.
- [12] P.F. Yan, Z.G. Ma, H.B. Li, et al. Evaluation of the shrinkage properties and crack resistance performance of cement-stabilized pure coal-based solid wastes as pavement base materials. *Construction and Building Materials*, 2024, 421, 135680.
- [13] P. Cheng, X. Zhou, E. Hou. Experimental research about shrinkage of cement stabilized gravel base. *Appl. Mech. Mater.*, 174-177 (2012), pp. 409-412,
- [14] L.S. Wang, A.Q. Shen, Z.H. Lyu, et al. Rapid regeneration cement-stabilized macadam: Preparation, mechanical properties, and dry shrinkage performance. *Construction and Building Materials*, 2022, 341, 127901.
- [15] 刘汉云飞,李仲玉,胡益铭.寒冷地区复掺脱硫灰膨胀剂水泥稳定碎石路面基层收缩性能研究[J].交通科技,2023,(02):46-50.
- [16] 马士宾,曲磊,任俊财,等.基于最优混合设计法的掺膨胀剂的水泥稳定碎石配合比设计[J].公路,2022,67(01):63-69.
- [17] 李欢.冀北地区掺膨胀剂水泥稳定碎石材料抗裂性能研究[D].河北建筑工程学院,2021.
- [18] 柴海成.膨胀剂对水泥稳定碎石温缩性能及干缩性能的影响研究[J].路基工程,2018,(03):95-99.
- [19] 应荣华,张福生,祝明.基于路用要求的膨胀剂水稳碎石防裂研究[J].中外公

- 路,2013,33(02):278-281.
- [20]曹慧,沈菊男,膨胀剂对再生骨料基层力学与干缩性能的影响[J].山西建筑,2022,(20):7-10+28.
- [21]X. Chen, M. Zhou, Z. Fan. Influence of SO₃ content on drying shrinkage cracking resistance of cement-fly ash stabilized crushed-stones. Mater. Sci. Forum, 620-622 (2009), 279-282,
- [22]Y.X. Ye, L.Q. Li, Y.F. Song, et al. Effects of nano MgO and light-burnt MgO on mechanical properties and long-term expansion of paste mixed with Portland cement and slag. Construction and Building Materials, 2024, 443, 137756.
- [23]朱子龙,魏磊,史中玲,等.骨料嵌锁型垃圾焚烧灰渣路面基层的制备与性能研究[J].武汉理工大学学报,2024,46(08):8-14.
- [24]张先伟,高永红,王平,等.电解锰渣-生活垃圾焚烧底渣协同制备路面基层材料试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(04):1363-1373.
- [25]刘族东.磷尾矿路面基层材料应用研究[D].武汉理工大学,2022
- [26]H.B. Li, J.M. Sun, C.Y. Cui, et al. Cement-stabilized large-sized steel slag base course based on vibration compaction method: Mechanical properties, shrinkage properties, and numerical simulation. Construction and Building Materials, 2023, 404, 133298.
- [27]C. Jing, W.H. Shi, N. Wang, et al. Laboratory investigation of solid wastes combined with tunnel slag in cement stabilized base of asphalt pavement. Construction and Building Materials, 2023, 392, 131807.
- [28]Z. Li, X. Shen. Experimental study on cement-based stabilized phosphogypsum modified by sodium silicate in pavement base. Journal of Engineering Geology, 2019, 27 (1), 80-87.
- [29]G.X. Chen, S.Y. Wang. Research on macro-microscopic mechanical evolution mechanism of cement-stabilized steel slag. Journal of Building Engineering, 2023, 75, 107047.
- [30]D.Q. Zhao, B.L. Zhang, W.G. Shen, et al. High industrial solid waste road base course binder: Performance regulation, hydration characteristics and practical application. Journal of Cleaner Production, 2021, 313, 127879.

三、实施方案

1. 拟解决的关键问题

(1) 材料性能精准调控关键技术: 聚焦镁渣晶体与复合胶凝材

料性能优化。研究通风急冷、添加剂对镁渣晶体结构的作用，建立参数、晶体特征与材料活性、膨胀特性的关系；通过“先磨后混”工艺制备复合胶凝材料，从微观水化进程揭示膨胀与强度差异原因，构建强度 - 膨胀协同发展模型，实现材料性能精准调控。

(2) 基层材料应用与效益评估关键技术：涵盖基层材料设计与施工效益评估。基于材料内部结构提出抗裂型骨料级配设计方法，研究不同掺量下材料性能并建立响应面模型；总结施工工艺经验形成指南，跟踪检测验证，从力学、环境、成本和社会影响多维度综合评估材料应用效益。

2. 主要研究内容及实施方案

(1) 基于活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术研究

研究通风急冷等方法对热法炼镁排出镁渣内部晶体结构的影响，分析初始温度、降温速率等参数对镁渣中 C_2S 和 MgO 结构特征的作用；探究添加剂对 C_2S 晶型转变的抑制效果；基于力学性能与收缩特性测试，建立参数、晶体特征与镁渣活性、膨胀特性间的关系，提出活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术。

(2) 镁渣-水泥复合胶凝材料强度-膨胀协同调控技术研究

采用“先磨后混”工艺制备急冷镁渣-水泥复合胶凝材料，研究不同细度、掺配比例镁渣对复合胶凝材料性能的影响，建立强度和膨胀协同发展模型，提出制备技术。从微观水化进程出发，系统研究水化产物相演变，定量表征关键组分形成速率，探明膨胀与强度性能差异的关键致因；基于相关理论定量分析浆体内部结晶应力，揭示补偿收缩效应机理。

(3) 低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料设计与路用性

能评价

基于常用材料组成设计方案,从材料内部结构角度出发,结合贝雷法与主骨料空隙填充法,提出间断级配的抗裂型骨料级配设计方法。研究不同镁渣-水泥复合胶凝材料掺量下的力学性能变化规律,分析其抵抗收缩开裂能力,评价抗干湿循环和冻融循环性能。以相关试验结果为响应值,建立响应面模型,提出不同交通等级条件下材料组成设计建议。借助多种技术分析微观结构,揭示强度形成及抗裂性能提升机理。

(4) 镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料施工关键技术与综合效益评价

选择合适段落进行镁渣-水泥稳定碎石混合料基层施工试验段,总结施工制备、现场拌合、摊铺和压实等工艺经验,形成施工技术指南。跟踪检测试验路,观测裂缝形式和数量,验证室内试验结论。计算生命周期环境影响得分和成本,定量计算社会影响潜值,从力学性能、环境、成本和社会影响角度综合评价综合效益。

3. 技术路线

3.1 研究技术方案

(1) 基于活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术研究

① 镁渣晶体调控的急冷作用机制

本研究技术方案以通风急冷法为核心调控手段,构建“参数优化-晶体表征-性能验证”三位一体的研究框架。在急冷参数优化层面,以热法炼镁排出的 1200~1400℃ 炽热镁渣为对象,通过可控气氛马弗炉模拟实际排放温度,设计初始温度(1200℃、1300℃、1400℃)与降温速率(5℃/min、20℃/min、50℃/min、100℃/min)的组合工况,采用强制通风(风速 0.5~2.0m/s)与水冷/气冷复合急冷方式,系统研

究不同急冷条件下镁渣中 C_2S 晶型转变 ($\beta-C_2S \rightarrow \gamma-C_2S$)、晶粒尺寸及晶体形貌的变化规律。结合 X 射线衍射 (XRD) 定量分析 $\beta-C_2S$ 含量变化, 扫描电子显微镜 (SEM) 观察晶体形貌演变, 激光粒度分析测定晶粒尺寸分布, 明确初始温度与降温速率对晶体结构-活性-膨胀特性的影响阈值。结合 SEM 微观结构分析揭示固溶体形成与晶粒细化的协同作用机制, 最终形成可复制、可推广的通风急冷-固溶改性-机械活化协同调控技术方案, 确保技术适配实际路面施工要求并实现工程化应用。

② 添加剂对 C_2S 相变抑制的微观作用机理与掺量优化

针对 $\beta-C_2S$ 向 $\gamma-C_2S$ 的活性衰减问题, 选取 BaO 、 B_2O_3 、 P_2O_5 作为晶型稳定添加剂, 设计单因素与正交实验。通过高温原位 XRD ($800 \sim 1200^\circ C$) 结合差示扫描量热法 (DSC), 追踪添加剂掺量 ($0.5\% \sim 2\%$ 质量分数) 对 C_2S 相变温度、相变速率的影响, 揭示 Ba^{2+} 、 B^{3+} 、 P^{5+} 离子在 C_2S 晶格中的取代机制 (如 $[BO_3]^{3-}$ 基团对 $Si-O$ 键的极化作用)。同时, 结合急冷处理后的镁渣, 采用核磁共振 (NMR) 分析 MgO 的晶格缺陷与水化活性的关联, 通过电化学阻抗谱 (EIS) 评估添加剂对 $Mg(OH)_2$ 膨胀组分生成速率的调控效果。最终建立添加剂种类-掺量- C_2S 相变抑制率- MgO 水化速率的多参数关系模型, 确定复合添加剂的最优配比。

① “先磨后混”工艺优化与宏观性能协同调控

基于急冷参数 ($\geq 150^\circ C/min$) 与添加剂优化 (BaO 4wt%、 B_2O_3 1.5wt%、 P_2O_5 0.8wt%) 的镁渣样品, 通过“先磨后混”工艺与 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥复合, 设计镁渣细度 (比表面积 $350 \sim 500 m^2/kg$) 与掺量 ($10\% \sim 50\%$) 的双因素正交实验。采用维卡仪精确测定凝结时间 (初凝、终凝), 参照《水泥胶砂强度检验方法 (GB/T 17671)》测试 7d/28d

抗压/抗折强度,通过约束膨胀试验(试件尺寸 $40\times 40\times 160\text{mm}$,两端埋设铜测头)测定28d线性膨胀率。结合响应面法(RSM)构建细度-掺量与凝结时间、强度、膨胀率的三维非线性模型,经方差分析验证模型显著性($p<0.05$),明确细度对镁渣反应活性的提升阈值及掺量对膨胀率的调控边界,最终筛选出最优组合,形成基于强度-膨胀协同的复合胶凝体系制备工艺参数。

② 微观水化进程与强度-膨胀差异的关键致因研究

采用多尺度微观表征技术系统解析水化产物演变规律:通过X射线衍射(XRD)定量分析3d/7d/28d龄期水化产物的相组成,重点追踪 $\beta\text{-C}_2\text{S}$ ($2\theta=32.0^\circ\text{-}32.5^\circ$)与 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ ($2\theta=31.0^\circ\text{-}31.5^\circ$)的衍射峰强度比值变化;结合热重-差热分析(TG-DTG)精确测定 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 生成量(通过 $280\text{-}450^\circ\text{C}$ 失重阶段计算,误差 $\leq 2\%$)及C-S-H凝胶脱水失重($105\text{-}400^\circ\text{C}$);利用 ^{29}Si 魔角旋转核磁共振(^{29}Si MAS NMR)解析C-S-H的硅氧四面体聚合度(Q^0 、 Q^1 、 Q^2 分布),明确镁渣掺入对硅酸盐链结构的调整作用;通过扫描电子显微镜(SEM)结合能谱仪(EDS)观察 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体形貌(片状/针状)与分布特征(如均匀填充孔隙或局部聚集),揭示其与C-S-H凝胶的界面结合状态(如化学键合或物理包裹)。最终建立 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 生成速率(通过XRD峰面积变化率表征)与C-S-H凝胶形成速率(通过TG失重速率表征)的定量相关模型($R^2\geq 0.9$),阐明强度增长(依赖C-S-H致密化)与膨胀发展(依赖 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 体积变化)的差异关键致因。

③ 结晶应力定量分析与补偿收缩效应机理

基于热力学与孔隙力学理论构建复合胶凝材料浆体内部结晶应力分析模型:通过热力学计算模拟水化体系中 Ca^{2+} 、 SiO_4^{4-} 、 Mg^{2+} 的活度系数,预测 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的过饱和度与结晶驱动力;结合压汞法(MIP)

测定浆体的孔径分布,计算孔隙壁对结晶应力的约束作用。采用原位XRD技术实时追踪 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体的生长过程(如晶粒尺寸从10nm增至100nm),结合应变片监测试件内部应变变化,通过弹性力学公式($\sigma=E\cdot\varepsilon$, E 为弹性模量)定量计算结晶应力。进一步验证补偿收缩效应:对比纯水泥浆体与镁渣基复合浆体,分析 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 膨胀应力对干燥收缩的抵消效果。最终揭示强度-膨胀协同机理:C-S-H凝胶提供早期强度支撑, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的适量膨胀填充孔隙并补偿收缩,两者动态平衡实现“强度不降、膨胀可控”的补偿收缩效应。

(3) 低收缩抗裂镁渣基复合稳定碎石基层材料设计与路用性能评价

① 胶凝材料掺量优化与多目标响应面模型构建

调整镁渣基复合胶凝材料掺量(4~10%),系统研究其对力学性能与耐久性的影响。通过无侧限抗压强度(7d、28d)、劈裂强度(28d)、弯拉强度(三点弯曲法,7d)测试,结合温度-湿度耦合收缩试验($20^\circ\text{C}\rightarrow 50^\circ\text{C}$ 升温+30% $\rightarrow$ 80%相对湿度变化,监测28d收缩开裂情况),量化胶凝材料掺量对强度增长与抗裂能力的调控效果。采用Box-Behnken响应面法(RSM),以级配参数和胶凝材料掺量为输入变量,力学性能(抗压强度)、抗裂性(收缩率)为响应值,构建多目标优化模型,确定适用于不同交通等级的材料组成设计阈值。

② 镁渣基复合胶凝材料稳定碎石材料强度与抗裂性能提升机理

采用X射线衍射(XRD)分析水化产物相组成(如C-S-H、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、AFt相),结合热重-差热分析(TG-DTG)定量测定 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的生成量;通过扫描电子显微镜(SEM)观察骨料-胶凝材料界面过渡区(ITZ)的致密性,结合能谱仪(EDS)分析界面元素分布(Ca/Si比)。进一

步利用 CT 扫描技术 (分辨率 $\leq 5\mu\text{m}$) 重构材料内部孔隙结构 (总孔隙率、临界孔径), 结合孔隙力学理论计算收缩应力与孔隙约束力的平衡关系, 揭示与镁渣基复合胶凝材料水化硬化过程对强度提升与抗裂性改善的协同作用机理。

(4) 镁渣基复合胶凝材料稳定碎石基层施工技术与综合效益评价

① 施工关键技术验证与工艺标准化

基于前期材料设计成果, 选择典型路段开展镁渣基胶凝材料稳定碎石基层施工试验段。对该复合胶凝材料与碎石的混合工艺进行优化, 研究不同拌合方式、压实工艺对基层性能的影响, 确定最佳施工参数。同时, 开展现场试验段铺设, 监测施工过程中的各项指标, 评估基层的压实度、平整度及强度等关键性能。最终, 通过对比分析生产路段基层与镁渣基复合胶凝材料稳定碎石基层的性能差异, 验证该技术的可行性与优越性。

② 全生命周期综合效益量化评价

采用 BEES (Building for Environmental and Economic Sustainability) 模型, 系统评估镁渣基复合稳定碎石的环境-经济-社会综合效益。环境影响评价选取全球变暖 (CO_2 当量)、酸化 (SO_2 当量)、富营养化 (PO_4^{3-} 当量) 等 6 类指标, 通过生命周期清单分析 (LCI) 量化原材料开采 (镁渣、水泥)、生产 (粉磨、拌合)、施工 (运输、摊铺)、使用 (维护) 及废弃阶段的资源消耗与污染物排放 (如镁渣利用减少的 CO_2 排放量)。经济成本计算涵盖直接成本 (原材料费、施工费) 与间接成本 (裂缝维修费、交通延误费), 对比传统水泥稳定碎石的全生命周期成本。社会影响评价引入社会自愿支付成本 (WTP), 通过问卷调查 (样本量 ≥ 300) 与专家打分法, 量化公众对固废材料的接受度 (如愿意为环保材料支付 5%~10%溢价) 及政府补

贴意愿(如每吨镁渣利用补贴 30~50 元)。最终构建“环境-经济-社会”三维评价矩阵,采用层次分析法(AHP)确定各维度权重,计算综合效益得分,明确其规模化应用的优先场景。

(2) 工作流程

首先开展镁渣晶体调控技术研究,分析通风急冷参数及添加剂对镁渣晶体影响,建立相关关系并形成调控技术。接着进行镁渣 - 水泥复合胶凝材料研究,采用“先磨后混”工艺制备材料,研究镁渣细度、掺量对性能影响,建立协同发展模型,从微观角度探明性能差异原因并揭示补偿收缩机理。随后开展低收缩抗裂基层材料设计,基于特定方法设计级配,研究不同胶凝材料掺量下力学性能与抗裂能力,建立响应面模型提出设计建议,分析微观结构与性能提升机理。最后进行施工关键技术与综合效益评价,铺筑试验路总结施工工艺,跟踪检测验证结论,从多角度综合评价材料综合效益,实现从研究到应用的完整流程。

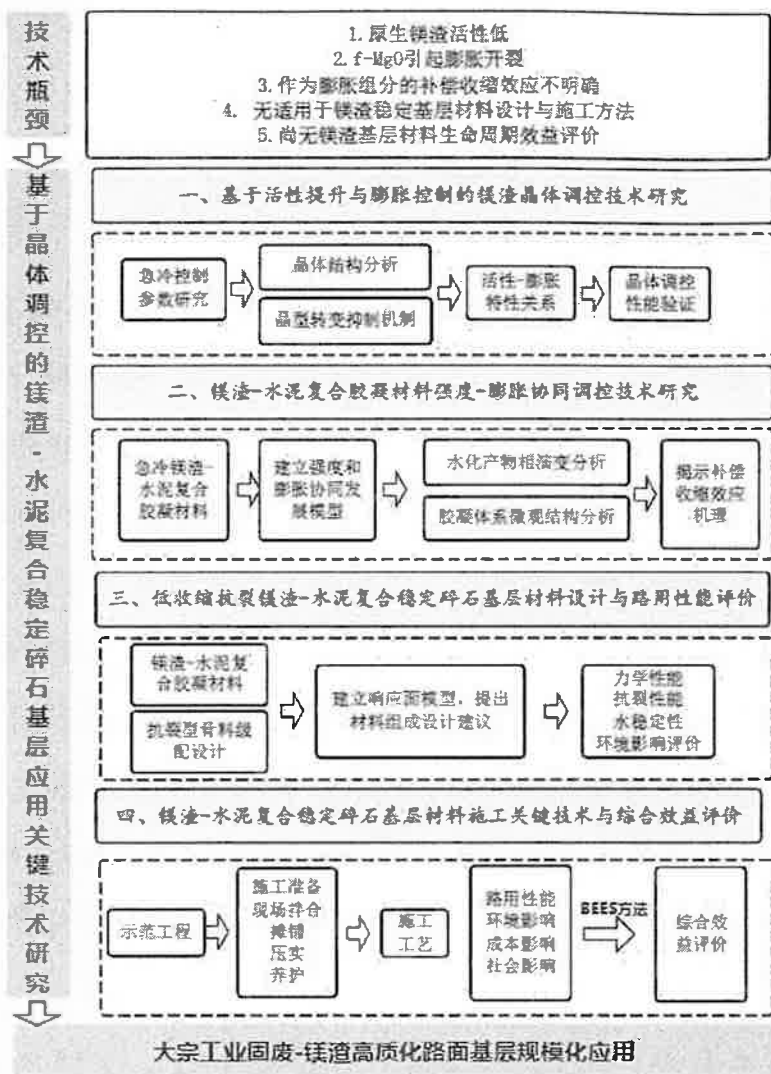


图 3.1 技术流程图

4. 后续技术改造

本项目完成后将实现镁渣基复合胶凝材料稳定碎石基层力学性能与抗裂性能大幅度提升，生产成本较传统水泥降低 15% 以上，技术成熟度达中试阶段，具备规模化生产基础。随着“双碳”政策深化，绿色建材在基建工程中的渗透率持续提升，交通基础设施建设特别是道路基层等领域对低成本、低碳胶凝材料需求强劲，预计到 2028 年相关市场规模超 800 亿元。产业化方面，该技术可依托现有水泥生产线改造，设备适配性高，初期投资回收期约 3-4 年；同时，镁渣等固废

原料成本低廉且供应稳定,陕西省仅榆林市年镁渣产生量超300万吨,可支撑区域性产业集群建设。示范工程将验证其在工程中的可靠性,结合产学研用协同创新模式,技术可快速向全国镁渣等固废富集区推广,并延伸至“一带一路”沿线国家基建项目,形成“固废处理-低碳建材-工程应用”的闭环产业链,兼具环境效益与经济价值,产业化前景广阔。

5. 有关技术经济指标

(1) 镁渣: 活性指数 ≥ 0.75 , $f\text{-MgO}$ 占 MgO 总量 $\leq 15\%$;

(2) 镁渣-水泥复合稳定水泥碎石: 7d 无侧限抗压强度 $\geq 5.5\text{Mpa}$, 干燥收缩值 $\leq 200 \times 10^{-6}$ 。

四、项目承担单位及参加单位概况

1. 单位概况

承担单位: 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 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。

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。同时，与数十家世界 500 强企业建立了深度战略合作关系。

参与单位：陕西省榆林市公路局

榆林市公路局是陕西省榆林市交通运输局下属的政府工作部门，主要负责国省干线公路建设、养护管理和路政执法，同时指导监管农村公路相关工作，具体涵盖养护计划编制、质量安全监管等职能。

参与单位：神木市泽川环境科技有限公司

环保工程的设计、施工及设备安装、调试；环保技术及环保工程咨询服务；环保设备的研发、销售；环境质量监测；污染源监测；建设项目环保竣工验收。

参与单位：中铁十七局第二工程有限公司

世界 500 强中国铁建下属国企，前身为铁道兵，总部西安。拥有矿山工程特级等多项一级资质，承建京沪高铁、鲁雷公路等国内外重难点工程，获鲁班奖、詹天佑奖等国家级殊荣。

参与单位：陕西铁路工程职业技术学院

陕西铁路工程职业技术学院是省属全日制公办高职院校，前身为 1973 年铁道部渭南铁路工程学校。现为国家“双高计划”高水平高

职学校建设单位。

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
关博文	长安大学	男	41	副教授	道路工程	项目负责人, 总体 方案制定
李少平	陕西省榆林市公路局	男	51	副高	公路与桥 梁	技术负责人
谢涛	陕西省榆林市环境工 程评估中心	男	52	副高	水资源与 环境工程	环境影响分析
王云康	陕西省榆林市生态环 境局	男	45	科长	环境科学	生态分析
任涛	中铁十七局第二工程 有限公司	男	42	正高级工 程师	道路工程	技术指导
夏雨	陕西铁路工程职业技 术学院	男	47	工程师	公路与桥 梁	项目实施
祁汉涛	陕西省榆林市公路局	男	47	工程师	公路与桥 梁	试验路施工
何欣易	陕西省榆林市公路局	男	49	助理工程 师	交通土建 工程	试验路施工
朱建勋	陕西省榆林市公路局	男	47	副高	公路与桥 梁	试验路施工
马小鹏	陕西省榆林市公路局	男	39	工程师	交通运输	质量控制
刘伟	陕西省榆林市公路局	男	46	工程师	公路工程	质量控制
陈慧娴	陕西省榆林市公路局	男	50	工程师	水利工程	镁渣活性激发
齐贺停	神木市泽川环境科技 有限公司	女	30	助理工程 师	食品科学 与工程	镁渣活性激发
常安	榆林路桥建筑工程公 司	男	27	博士研究 生	道路材料	室内试验
郭艳	榆林市兴达建安有限 责任公司	男	27	本科生	道路材料	室内试验
曹轩豪	长安大学	男	24	硕士研究 生	道路材料	室内试验

3. 各自承担的主要工作

长安大学作为项目主导单位, 负责整体研究规划与关键技术研发, 包括晶体调控、强度-膨胀协同调控、材料设计方法及生命周期评价模型构建等核心工作。榆林市公路局提供工程应用, 协助开展现场试

验与施工技术优化。陕西省榆林市生态环境局与陕西省榆林市环境工程评估中心负责环保政策指导及环境影响评估,确保研究符合生态要求。神木市泽川环境科技有限公司提供活性镁渣中试生产支持。中铁十七局集团第二工程有限公司参与施工技术优化与工程示范,推动成果转化应用。各单位协同合作,共同推动镁渣在路面基层材料中的高效利用与环保推广。

4. 项目主要负责人情况

关博文,男,工学博士,1985年1月生,吉林省吉林市,副教授,博士生导师,长安大学材料科学与工程系主任,中国硅酸盐学会固废与生态材料分会委员,陕西省优秀博士学位论文获得者。主要从事固废材料在道路工程中应用等方面研究工作。先后主持自然科学基金面上项目、国家自然科学基金青年项目、中国博士后基金项目、青海省自然科学基金、陕西省自然科学基金等国家省部级项目10余项。目前担任《Journal of Materials Science: Materials in Engineering》、《青海交通科技》编委。发表期刊及会议论文80余篇,其中SCI/EI检索文章50余篇。获青海省科技进步二等奖2项,中国公路学会奖二等奖2项,安徽省交通科技进步二等奖2项。

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

项目依托榆林市G242绥德至清涧路面改造工程,本次路面改造K802+780~K823+780段起点位于绥德海洼沟,向南经田庄镇,于K809+000处进入清涧县,经石咀驿镇,终点位于清涧慕家河,全长

21.0 公里。本路段全段 1999 年改建为二级路，路面结构为 3cmAC-13 细粒式沥青混凝土 4cmAC-16 中粒式沥青混凝土+20cm 灰土碎石基层+20cm 石灰土底基层，2006 年进行中修，加铺 4cmAC-16 中粒式沥青混凝土，2020 年采用 1cm 双层精细同步碎石预防性养护。本路段途径绥德、清涧为榆林南北交通大动脉，是榆林至延安、西安的主要货物运输通道，在区域路网中具有重要作用。本路段交通流量大，重载货运车辆多，路面有不同程度纵、横向裂缝、龟裂及块状裂缝，局部路段已出现沉降。在改造工程中计划铺筑试验路镁渣-水泥复合稳定碎石基层不低于 100m。

2. 投资来源

陕西交通运输厅补助 19.80 万元，其余资金 60.2 由参与单位榆林市公路局、西安正元环保技术咨询有限公司自筹经费解决。

3. 工程进度与项目科研进度的配合

工程进度与项目科研进度紧密配合，在 G242 绥德至清涧路面改造工程筹备阶段，科研同步开展镁渣特性研究及复合胶凝材料前期试验，确定材料基础参数。施工准备期，依据科研成果设计镁渣 - 水泥复合稳定碎石基层配合比，完成试验路铺筑方案。工程进行至 K802+780~K823+780 段基层施工时，按计划铺筑不低于 100m 试验路，科研团队现场跟踪，实时监测施工工艺参数、材料性能变化。施工后期，对试验路进行持续跟踪检测，收集裂缝等路用性能数据，与室内科研分析结论相互验证。同时，根据工程实际反馈，及时调整优化科研方向与成果，确保科研成果能有效指导实际工程，实现科研

与工程相互促进、紧密融合。

4. 组织管理形式

本项目采用矩阵式组织管理形式，成立以项目负责人为核心的管理团队，横向整合科研、工程、财务等多部门专业人员，纵向按研究内容划分小组，明确各小组职责与任务。科研小组专注技术研发与试验，工程小组负责依托工程实施与试验路铺筑，财务小组保障资金合理使用与监管。通过定期会议、信息共享平台等加强沟通协作，确保科研与工程紧密结合，推进项目，实现资源优化配置与目标顺利达成。

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	19.8	合 计	60.0	19.8	40.2
工程配套研究经费	40.2	1.设备费	0.0	0.0	0.0
单位自筹	0.0	（1）购置设备费	0.0	0.0	0.0
其他经费	0.0	（2）设备改造与租赁费	0.0	0.0	0.0
		2.业务费	37.0	14.8	22.2
		（1）材料费	14.0	3.8	10.2
		（2）测试化验实验加工费	12.0	3.0	9.0
		（3）燃料动力费	0.0	0.0	0.0
		（4）差旅费/会议费/国际合作与交流费	6.0	5.0	1.0
		（5）出版/文献/信息传播/知识产权事费	5.0	3.0	2.0
		（6）其他费用	0.0	0.0	0.0

		3.劳务费	17.0	3.0	14.0
		(1) 专家咨询费	0.5	0.5	0.0
		(2) 聘用人员劳务费	0.0	0.0	0.0
		(3) 其他劳务费	16.5	2.5	14.0
		(二) 间接费用	6.0	2.0	4.0
		4.管理费	6.0	2.0	4.0
		5.绩效支出	0.0	0.0	0.0

经费测算说明

1.业务费

(1) 材料支出

本项经费用于项目实施过程中消耗的各种原材料、辅助材料等低值易耗品的采购及运输、装卸、整理等费用，共计 14.0 万元，其中，使用厅拨经费 3.8 万元。

序号	材料名称	数量/单位	总经费（万元）	其中：厅拨经费（万元）
1	晶体结构稳定添加剂	60 瓶/500 元/瓶	2.0	2.0
2	活性激发剂	200kg/100 元/kg	2.0	1.8
3	水泥	80t/500 元/t	4.0	0.0
4	外加剂	5t/8000 元/t	4.0	0.0
5	碎石	200t/200 元/t	2.0	0.0
费用合计			14.0	3.8

(2) 测试化验实验加工支出

本项经费用于项目实施过程中支付给外单位（包括项目承担单位内部独立经济核算单位）的检验、测试、化验、实验及加工等费用，共计 12.0 万元，其中，使用厅拨经费 3.0 万元。

序号	测试化验实验加工项目	实施单位	总经费（万元）	其中：厅拨经费（万元）
1	活性指数测试 20 组	长安大学	1.0	1.0
2	矿物成分分析 20 组	长安大学	2.0	2.0
4	CT 测试/5 组	长安大学	4.0	0.0
5	收缩测试/10 组	长安大学	5.0	0.0
费用合计			12.0	3.0

（3）差旅支出

本项经费用于项目实施过程中开展科学实验（试验）、科学考察、业务调研、学术交流等所发生的外埠差旅费、市内交通费用等，共计 4.0 万元，其中，使用厅拨经费 4.0 万元。

序号	时间、人数、地点、任务	总经费（万元）	其中，厅拨经费（万元）
1	学术交流、4 人、上海、学术会议	2.0	2.0
2	工程调研、8 人、榆林、试验路铺筑	2.0	2.0
费用合计		4.0	2.0

（4）会议支出

本项经费用于可行性研究评审、研究大纲评审、项目验收及相关研讨会，共计 2.0 万元，其中，使用厅拨经费 2.0 万元。

序号	会议名称	总经费（万元）	其中，厅拨经费（万元）（万元）
1	研究大纲（实施方案）评审	0.0	0.5
2	技术研讨、交流会	0.0	0.5
3	成果验收鉴定会	0.0	0.0
费用合计		2.0	1.0

（5）出版/文献/信息传播/知识产权事务/印刷支出

本项经费用于项目实施过程中，需要支付的出版费、资料费、印刷费、翻译费、专用软件购买费、数据购买和调查费、文献检索费、

专业通信费、专利申请及其他知识产权事务等，共计 5.0 万元，其中，使用厅拨经费 3.0 万元。

序号	项目	总经费（万元）	其中，厅拨经费（万元）
1	学术论文出版费	2.0	2.0
2	印刷费	2.0	0.0
3	专利申请费	1.0	1.0
费用合计		8.0	3.0

2. 劳务费

（6）劳务性支出

本项经费主要用于项目实施过程中支付给参与项目的研究生、博士后、访问学者和项目聘用的研究人员、科研助理及辅助人员等的劳务性支出，共计 17.0 万元，其中，使用厅拨经费 3.0 万元。

序号	时间、人数、事由	总经费（万元）	其中，厅拨经费（万元）
1	研究生 3 人，10 个月，1000 元/月	3.0	3.0
2	临时劳务人员 2 人，20 个月，3500 元/月	14.0	0.0
.....			
费用合计		17.0	3.0

（7）咨询专家支出

本项经费主要用于项目实施过程中支付给临时聘请的咨询专家的费用。

序号	时间、人数、事由	总经费（万元）	其中，厅拨经费（万元）
1	每次 1000 元，共计 5 次	0.5	0.5
2			
.....			
费用合计		0.5	0.5

3. 间接费用

(14) 管理费

本项经费用于项目实施过程中项目承担单位为项目研究提供的现有仪器设备及房屋占用,日常水、电、气、暖等消耗,以及有关管理费用的补助支出。管理费 6.0 万元,其中,使用厅拨经费 2.0 万元。

(15) 绩效支出

无

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)	0
		(1) 授权发明专利	0
		(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)	2
		(1) 其中 SCI 索引收录数	1
		(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)	0
		(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	0
	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

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		3、其他科技成果产出	0
		(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	0
		(4) 新装备(装置)	0
		(5) 平台/基地/示范点	0
		(6) 中试线	0
		(7) 生产线	0
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	0
		(1) 博士、博士后	0
		(2) 硕士	0
		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)	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)	0
效果类指标	经济效益	1、新增产值(万元)	0
		2、新增销售(万元)	0
		3、新增出口创汇(万美元)	0
		4、新增利润(万元)	0
	社会效益	1、新增税收(万元)	0
		2、新增就业人数	0
		3、就业培训(人次)	0
		4、带动农民增收(万元)	0

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
		5、培训和指导科技服务（人次）	0
		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			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

1.项目预期目标（项目的考核目标）

（1）攻克镁渣晶体调控难题，实现镁渣活性提升与膨胀控制，开发出高效镁渣-水泥复合胶凝材料制备技术，为低收缩抗裂基层材料提供性能优良的胶凝成分，推动工业废渣在道路工程中的高值化利用。

（2）形成镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料完整技术体系，涵盖级配设计、性能评价、施工工艺及综合效益评估，为道路基层建设提供绿色环保、经济可行的新方案，提升道路工程可持续性。

2.提交的研究成果及其形式

（1）《基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究》研究报告

（2）《镁渣-水泥复合稳定碎石基层设计与施工技术指南》

（3）发表论文 2 篇，其中提供不少于 1 篇与成果密切相关的《中文核心期刊要目总览》论文

（4）申请实用新型专利 2 项

3.经济、社会、环境效益分析

路面基层材料大量利用镁渣等固废材料，可实现镁渣“变废为宝”，

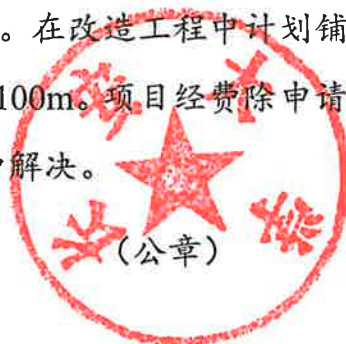
活化镁渣较基层用水泥成本降低 20%以上。本项目研究成果一方面解决了镁渣造成的占地面积大、地下水污染和危害周边环境的问题,另一方面将有效缓解陕西公路快速发展背景下带来的对水泥等胶凝材料供不应求、工程成本增高的难题,同时,大幅度提升路面基层的抗裂性及耐久性,有效延长道路的使用寿命,进而在道路的全生命周期内大幅降低维护成本及环境负荷,对促进陕西省交通绿色发展和经济社会可持续发展具有重要意义。

九、其它需要说明的问题

无

十、申请单位意见

项目依托陕西省榆林地区工业废弃物-镁渣进行研究及道路工程资源化应用,研究成果将拟于项目依托榆林市 G242 绥德至清涧路面改造工程,本次路面改造 K802+780~K823+780 段起点位于绥德海洼沟,向南经田庄镇,于 K809+000 处进入清涧县,经石咀驿镇,终点位于清涧慕家河,全长 21.0 公里。在改造工程中计划铺筑试验路镁渣-水泥复合稳定碎石基层不低于 100m。项目经费除申请陕西交通运输厅补助外,其余资金由其他经费解决。



单位负责人: (签字)

科研项目专用章

年 月 日

基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究

大纲评审意见

2026年3月24日，陕西省公路局受陕西省交通运输厅委托在西安主持召开了“基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究”（项目编号：25-81K）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：重点突出材料制备与工程应用。

主任委员：



2026年3月24日

专家审查意见表

项目名称	基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究				
专家姓名	梁武星	职务/职称	正高	专 业	公路工程
专家单位	西安公路研究院			联系电话	13609110361

评审意见

同意审查通过。

- 建议：1. 突出应用^{4星}研究，须做底卷层如
何考核。
 2. 进一步确定经济指标
 的可实现性。
 3. 增加环保效益分析。

评审专家（签字）：

梁武星

26年3月24日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

项目名称	基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究				
专家姓名	赵以东	职务/职称	正高工	专 业	公路工程
专家单位	铜川市交通运输局			联系电话	13909190090

评审意见

以下意见仅供参考:

1. 该课题研究主要解决半刚性基层的收缩裂缝问题,有一定的局限性,如何控制由镁渣水泥复合胶凝材料的制作成本,是以后能否大范围推广应用的关键,建议深入研究。

2. 水泥中如果氧化镁含量过高会严重影响其安定性,研究时应充分考虑,并进行长期观察。

3. 建议制定区别于普通水泥稳定碎石的质量控制标准。

评审专家(签字):



2026 年 3 月 24 日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究				
专家姓名	路鑫	职务/职称	正高级工程师	专 业	公路工程
专家单位	陕西高速公路工程试验检测有限公司			联系电话	15091850063

评 审 意 见

项目基于活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术,研究了不同掺配比例对复合胶凝材料凝结时间、力学性能以及膨胀性能的影响规律以及路用性能变化规律,评价了镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料的综合效益。项目充分利用工业固废镁渣高质量应用于道路工程,降低路面基层建设过程中对传统水泥材料的依赖程度,有助于削减碳排放量,推动资源的高效循环与再利用,具有较好社会和经济效益。项目具有一定的研究基础,研究内容和实施方案详尽,依托项目落实,同意立项。建议如下:

- (1) 研究内容第三部分路用性能评价建议增加冻融循环试验以及冲刷试验等耐久性能指标;
- (2) 研究成果提交资料中除了施工技术指南外建议增加经济效益分析报告;
- (3) 项目经费估算表和项目绩效指标表与正文部分保持一致。

评审专家(签字):



2026年3月24日

(本意见入档,应填写工整,纸面不敷,可另加纸)

专家审查意见表

项目名称	基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究				
专家姓名	罗 强	职务/职称	教授	专 业	道路与铁道工程
专家单位	西南交通大学			联系电话	1390823860

评 审 意 见

大宗工业固废-镁渣高质量应用于道路工程，不仅显著减轻镁渣堆积对生态环境造成的负面效应，而且降低了路面基层建设过程中对传统水泥材料的依赖程度，有助于削减碳排放量，推动资源的高效循环与再利用。同时还能改善路面基层的抗裂性及耐久性，有效延长道路的使用寿命，进而在道路的全生命周期内大幅降低维护成本及环境负荷。项目研究符合可持续发展的要求，具有良好环境效益。

项目拟通过急冷与离子替换等晶体调控技术，实现镁渣活性提升与膨胀控制；基于不同细度和掺配比例镁渣与水泥熟料优化配伍，提出基于强度-膨胀协同的镁渣-水泥复合胶凝体系制备技术；基于主骨料空隙填充法，提出间断级配的抗裂型骨料级配设计；结合镁渣-水泥复合胶凝材料与力学性能、抗裂性能以及水稳定性能关系构建，提出低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料设计方法；依托示范工程，研究低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料制备、现场拌合、摊铺压实等施工工艺，形成技术指南。为此，课题的主要研究内容包括：1) 基于活性提升与膨胀控制的镁渣晶体调控技术研究；2) 渣-水泥复合胶凝材料强度-膨胀协同调控技术研究；3) 低收缩抗裂镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料设计与路用性能评价；4) 镁渣-水泥复合稳定碎石基层材料施工关键技术与综合效益评价。

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

建议：进一步聚焦研究内容，突出复合胶凝材料的抗收缩开裂性能。

评审专家（签字）：
2026 年 03 月 24 日

（本意见入档，应填写工整，纸面不敷，可另加纸）

专家审查意见表

杨晓军

项目名称	基于晶闸管的铁路水浸报警系统研究				
专家姓名	杨晓军	职务/职称	正高	专业	公路
专家单位	山西交通科研集团		联系电话	1380346885	

评审意见

项目研究目标明确，技术路线可行。
研究内容全面，同意通过评审。

建议：

1. 突出研究重点，可探索不同处理量时对
水浸报警的影响研究；
2. 开展技术经济效益评价分析。

评审专家（签字）：

杨晓军

2020年3月24日

（本意见入档，填写工整，纸面不敷，可另加纸）

基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究 (项目编号: 25-81K)

大纲评审专家委员会名单

序号	评审会职务	姓名	工作单位	所学专业	从事专业	职称/职务	签名
1	主任委员	梁武星	西安公路研究院	公路工程	公路工程	正高工	
2	委员	路鑫	陕西高速公路工程试验检测有限公司	公路工程	公路工程	正高工	
3	委员	赵卫东	铜川市交通运输局	公路工程	公路工程	正高工	
4	委员	罗强	西南交通大学	道路与铁道工程	路基工程	教授	网上评审
5	委员	申俊敏	山西交通科学研究院集团	公路工程	公路工程	正高工	网上评审

评审会参会人员签到表

姓 名	职称/职务	工作单位	联系电话
冯武	正高	西安公路学院	13609110361
冯武	正高	陕西高速检测	15091850063
赵红	正高	铜川公路局	13909190090
李娟	正高	省公路局	13891366187
王丽	正高	11	13609198857

2026年3月24日

专家意见处理表

项目名称：基于晶体调控的镁渣-水泥复合稳定碎石基层应用关键技术研究 (项目编号： 25-81K)

序号	姓名	建议内容	处理意见 (逐条回应，详细说明修改情况)
1	梁武星	突出应用性研究，低收缩如何考核？	考核目标已补充收缩指标，干燥收缩值 $\leq 200 \times 10^{-6}$ 。
2	梁武星	进一步确定经济指标，确保可实现性	进一步确定经济指标为活化镁渣较水泥成本降低20%以上。
3	梁武星	增加环境效益分析	研究内容中进一步补充环境效益分析相关内容。
4	路鑫	路用性能增加耐久性指标评价	补充了适用于陕北地区冻融循环相关研究内容。
5	路鑫	研究成果提交资料中建议增加经济效益分析报告	研究内容中补充经济效益分析内容

6	路鑫	经费估算表和项目绩效指标表与正文部分保持一致	已核查并保持一致
7	赵卫东	如何控制镁渣水泥复合材料制备成本？	多目标配合比设计将成本纳入设计目标以实现控制镁渣水泥复合材料成本
8	赵卫东	氧化镁含量过高会影响安定性，研究时应充分考虑	研究内容补充晶体优化技术，降低膨胀性难以控制的 f-MgO 含量
9	赵卫东	建议制定区别于普通水泥稳定碎石的质量控制标准	提出的成果中《镁渣-水泥复合稳定碎石基层设计与施工技术指南》中包括适用于镁渣基层的质量控制标准
10	罗强	进一步聚焦研究内容，突出复合胶凝材料的抗收缩开裂性能	修改研究内容，并补充收缩指标，干燥收缩值 $\leq 200 \times 10^{-6}$ 。
11	申俊敏	探索不同处理工艺对镁渣影响研究	研究内容已补充风冷、粉磨等工艺
12	申俊敏	开展经济效益评价分析	研究内容中补充经济效益分析内容

大纲评审委员会专家（签字）：

项目负责人（签字）：