

项目合同编号：25-70K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术

承担单位：陕西大锦高速公路管理有限公司

项目负责人：薛保勇

通讯邮编、地址：719319、陕西省榆林市神木市锦界镇锦绣大街孵化

中心八号楼

传真、电话：0912-8606992、15829779996

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：25-70K

陕西省交通运输厅 2025 年度交通科研项目

合 同 书

项目名称：重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术

承担单位：陕西大锦高速公路管理有限公司

项目负责人：薛保勇

通讯邮编、地址：719319、陕西省榆林市神木市锦界镇锦绣大街孵化

中心八号楼

传真、电话：0912-8606992、15829779996

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

研究内容一：采空区精细化物理探测及残余变形特征研究

(1) 采空沉陷区“空-天-地”一体化融合探测技术研究

结合星载 InSAR 技术、机载 LiDAR 技术、地表 GNSS 监测以及高精度瞬变电磁法对采空沉陷区进行识别与探测。

(2) 开采沉陷区动态预计模型及动态预测方法

利用 Knothe 时间函数并结合地表沉降力学模型，同时将地表实测数据进行对比分析，实现开采过程中地表沉陷动态预测模型和分析方法，计算结果与 InSAR 技术数据进行分析对比，并进行相互校验和修正。

研究内容二：浅伏厚基岩采空区治理宽度参数优化及稳定性评价

(1) 浅伏厚基岩采空沉陷机理及移动影响边界确定

通过理论分析、室内物理模拟实验、数值模拟等手段对浅伏厚基岩房柱式采空区地表沉陷变形的发育机制和沉陷机理进行研究。通过室内模型试验模拟房柱式煤层开挖、煤柱软化失稳、注浆充填等工况，研究采空区上覆岩层及地表的沉陷和变形规律，得到注浆前后地表变形的影响范围，通过数值模型试验对试验结果进行验证。

(2) 不同治理宽度路基结构安全评价与稳定性分析

在满足工程安全的条件，对规范给出的岩层移动角进行优化，探究 70°、82°、85°、88°四种工况的治理范围，通过数值模拟相结合的手段，模拟其安全稳定性。同时，探讨全充填、部分充填(墩台式充填、条带式充填、点式充填等)，离层注浆等加固方式下路基结构的稳定性，结合依托工程，现场开展试验段工作，对优化设计理论进行现场验证。

研究内容三：采空区重载路基动力特性试验研究

研究循环荷载作用下采空区带状充填路基动力响应研究，建立工程构筑物(路基)与采空区充填-非充填相互关系模式，采用数值模拟、物理相似模拟及现场试验的方法，研究汽车荷载大小及频率对不同埋藏深度和处治宽度条件下的采空区上覆岩层及高速公路地面变形和力学特性的影响。

研究内容四：房柱式采空区地下腔体体积探测及三维重建

采用跨孔测井、三维地震勘探等手段，实现对地下空洞的地球物理探测，根据其响应特征采用钻探手段进行验证，在钻孔内采用孔内电视、三维激光扫描等手段获得空洞特征，进而实现路域范围内采空区残余空洞的反演与场地稳定性的精确评价。

研究内容五：全固废注浆材料研发及灌注一体工程应用

(1) 改性水泥-粉煤灰-风积砂-煤矸石复合材料力学特性及适用性评价研究

围绕大锦高速沿线风积沙、煤矸石、粉煤灰等固废为研究对象，通过室内研究、现场试验等手段，利用多源固废材料的化学成分和矿相组成的协同效应来制备多源固废胶凝材料。探索不同质量比和水固比下，这些材料的浆料性能和单轴抗压强度。此外，通过微观试验分析这些材料的工作力学性能，以及影响其性能的因素，目的是提高材料在采空区注浆领域的应用性能，促进环境质量的改善、成本的节约，以及经济的全面绿色转型。

(2) 采空区灌注一体施工关键参数及工艺

深入研究采空区灌注一体施工的关键参数，如改性固废材料的强度、流动性、抗渗透性，以及最佳的浆液比例，以获得适当的流动性和硬化性能、填充的均匀性、抗渗透性和抗压强度等性能，确保浆液在采空区的可注性，并建立充填过程的实时监测与控制系统，重点关注施工过程的实时监测和控制，以保证施工质量和充填体的性能，减轻地表沉陷，保护地表环境，并提高采空区的稳定性。

(3) 不同工况、不同开采条件下注浆材料及工艺优化研究

规范规定浆液技术指标：

注浆孔采空区注浆充填材料检测指标：①锥桶流动度($<30s$)②扩展度($>500mm$)③浆液状态稳定，不离析④结石率($\geq 90\%$)⑤结石体 7d 抗压强度(路基下伏采空区 $\geq 0.6MPa$ ，桥隧下伏采空区 $\geq 2.0MPa$)

帷幕孔采空区充填材料检测指标：①塌落度($>200mm$)②扩展度($>500mm$)③拌和物状态稳定，不离析④结石率($\geq 98\%$)⑤结石体 7d 抗压强度(路基下伏采空区 $\geq 0.6MPa$ ，桥隧下伏采空区 $\geq 2.0MPa$)

根据前期全国固废注浆材料的研究成果，针对项目沿线查明的采空区不同埋深、不同地质条件、不同开采条件，结合公路采空区处治技术细则的相关技术指标，进一步对全国固废注浆材料的配比和浆液性能指标进行优化，并且根据注浆孔和帷幕孔的流动性、凝结时间的指标要求的不同，研究不同的浆液，最终形成安全可靠、分段治理、性价比高的处置方案。

在全国固废类采空区注浆材料研发过程中，重点开展煤矸石活性激发机理研究。

①微观表征测试：引入扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射仪(XRD)测试手段，对不同激发条件下浆体固化物的微观形貌、矿物组成及晶体结构进行表征。

②机理分析：通过分析水化产物种类及微观孔隙结构演变，揭示煤矸石活性激发的化学 - 物理机制，建立微观结构与宏观力学性能(强度、耐久性)的

关联模型，为材料配比优化提供理论依据。

(4) 采空沉陷区公路路基治理效果评价

注浆处置后的效果检测，可通过钻孔取芯、波速测试、结实体强度对处理效果进行检测，必要时还可通过地表变形监测等手段，建立采空区公路路基处治效果的综合评价体系。

① 钻孔取芯：通过全孔取芯直接观察采空区的浆液充填情况，主要检测浆液对采空区和断裂带的充填率，直观定性评价注浆的质量。主要检测浆液对采空区和裂隙带的充填率及注浆浆液的结石率。通过全孔取芯直接观察采空区的浆液充填情况，并结合钻探过程中钻进速度、循环液的消耗情况、孔内静止水位观测结果及孔壁的稳定性等，直观定性评价注浆的质量。

② 波速测试：通常情况下，孔内波速检测有单孔法和跨孔法，本项目采空区检测可采用单孔法，单孔法又分为弹性波速度测井和剪切波速度测井，两者各有优缺点，在现场检测过程中需要根据实际情况配合使用。

③ 孔内电视：孔内电视可以直观地观察孔壁岩体的空洞、裂隙、浆液的充填情况以及岩体的完整程度，根据图像的形态、颜色及光亮等信息，综合评价采空区的处治效果。

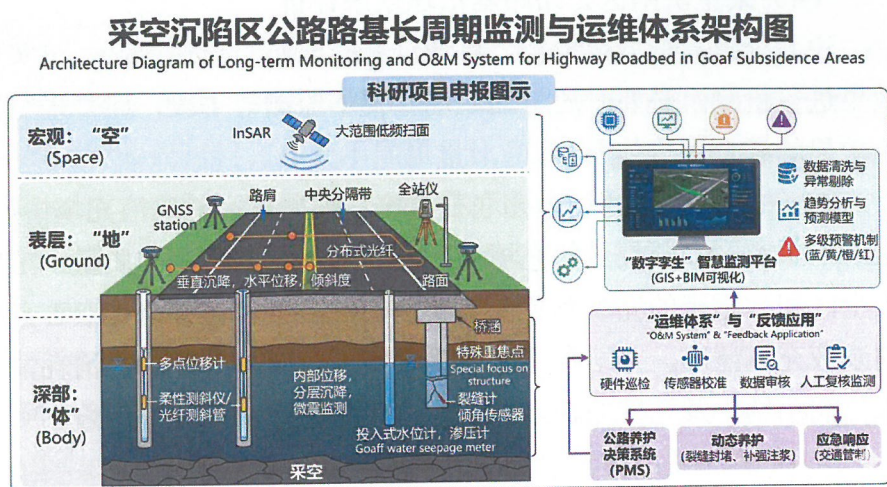


图 3.12 注浆液制备流程

(5) 打造采空区全固废灌注一体精准处治优化设计示范样板

本课题依托大柳塔至锦界高速公路项目，勘察设计前期发现问题并科研前置，通过“采空区精细化物理探测及残余变形特征研究、浅伏厚基岩采空区治理宽度参数优化及稳定性评价研究、全固废注浆材料研发及工程应用研究、采空区重载路基动力特性实验研究、重载高速公路下房采区精准探测及处治技术研究”等内容研究，将研究成果用于指导设计，为项目采空区处治优化设计提供科学参考。并且将项目打造成集“精细化探测、绿色低碳、经济低成本、高效安全可控、技术标准创新”的高速公路穿越采空区处治的示范样板工程，

并且为后续省内其他公路穿越采空区处治提供科学参考和借鉴。



2. 技术关键

关键技术 1: 引入等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 与 InSAR 技术融合的采空区综合勘探技术

InSAR 技术的优势在于能够调用历史影像数据, 进行高精度的雷达干涉成像, 对于采空区的范围、周期沉降值、沉陷危险区域划分具有显著优势。而 OCTEM 技术, 采用收发一体天线, 使接收天线处于一次场零磁通平面上, 在激发电流中断间隙, 接收面的一次场磁通不变, 不会产生一次场感应电动势, 有效消除一次场干扰, 从而实现对纯二次场信号进行观测, 提高勘察精度。二者融合, 对提取采空区的位置、形状、空间展布与地表变形特征具有显著优势。同时, 本研究中的正演计算中采用新的网格剖分方法, 达到三维有限元计算的快速与精确。反演计算中采用卷积-双向长短时记忆网络 (CNN-BiLSTM) 对物探数据进行深度学习, 建立神经网络模型, 达到精确的三维反演。

关键技术 2: 提出改性粉煤灰/风积砂/煤矸石全固废类采空区注浆充填材料的制备方法及灌注一体施工工艺、质量控制标准

改性粉煤灰/风积砂全固废类, 不仅具有低廉的价格, 同时具有良好的收缩率低、强度高、流动性高等力学性能, 建成灌注一体化设备和质量控制标准, 不仅能够大幅度降低采空处治技术成本, 同时能够提高路基动力力学承载特效。

关键技术 3: 提出浅伏厚基岩采空区治理合理宽度并给定其及稳定性评价计算方法

根据浅伏厚基岩断裂承载力学特性、采空沉陷机理及点状 (模袋法)、条带状 (帷幕法) 采空区处治技术, 提出小于开采移动角的影响带处治宽度范围, 保障路基安全稳定条件下精细化治理宽度和范围, 节约处治成本, 提高工程的

耐久性和稳定性。

关键技术 4: 提出重载高速公路下房采区“点-线”结合精准探测及膜袋快速封堵技术研究（定向探测）

采用坑道定向钻机实现房柱式采空区精准探测，结合常规钻机和三维激光扫描科学圈定注浆区域，基于注浆膜袋实现房采区控制充填，优化重载高速公路治理宽度，监测治理房采区上伏公路变形，评价治理房采区稳定性，形成重载高速公路下房采区精准探测、靶向注浆及稳定性监测一体化技术。

3. 依托工程（依托工作）

大柳塔至锦界高速公路暨包茂联络线即神米高速（S11）的北延伸段（府神高速（S10）的西段）。项目位于神木市境内，基本为南北走向，起点位于神木市大柳塔镇朱盖沟，向西南经过柳树峁村、黄特老海后，下穿包西铁路，路线向南折经过纳林采当、神木西站、补花兔、瑶镇、止于锦界镇枣稍沟，与神米高速顺接，路线全长 63.592km。项目的建设将完善榆林市高速公路网规划布局，有利于带动神木市资源的开发利用。同时，对加强省际间联系、促进省际间合作、推动晋陕蒙三省区交通一体化发展具有重要意义。

拟建高速公路 K0+923~K4+430 段穿越锃源煤矿，根据勘察成果，K2+913~K2+985 下部存在私采小煤窑采空区，线路以路基形式通过；K10+774~K11+272 段经过乾安煤矿，其中 K10+835~K12+000 下部存在小煤窑采空区，采空区内主要构造物有主线路基、孙家岔互通式立交（含匝道）、K0+739.594 被交线柳袁路上跨主线分离式立交桥、柳袁路改路等。

K10+835~K12+000 为乾安煤矿 1-2 上煤层采空区域。西南侧的实际开采区域已经超过矿权边界。开采方式为平硐房柱式炮采，顶板基本无支护，回采率约 50%。开采的 1-2 上煤层厚度 2.2~3.8m，平均开采厚度约 2.5m，水平状。顶板为灰白色砂岩，属软弱覆岩。底板为深灰色砂质泥岩、泥质砂岩，采空区无充填，局部有积水。采空区底板标高+1120~+1132m，埋深 23.6~66.7m，空洞高度 1.5~3.8m，采深采厚比 6.9~26.4，属于浅层采空区。停采时间超过 7 年，属于老采空区，地面变形不明显，目前剩余空隙率约 75%。

鉴于目前关于高速公路穿越老采空区的处治经验尚不完善，再加上拟建高速公路建成通车后行车速度较快、车流量大，且多为重载车辆，若未能处治到位，极有可能发生老采空区的“活化”现象。而采空区“活化”导致的覆岩及地表二次移动变形波及到上方高速公路，会破坏路基，导致路面隆起或开裂，严重威胁车辆运行安全。由此可见，如何保障车辆的运行安全是煤矿老采空区上方高速公路建设的关键问题。为了避免老采空区“活化”可能形成的地表沉降、垮塌、裂缝等灾害给高速公路工程的建设和运营带来安全隐患，针对拟建道路工

程性质及下伏采空区的状况，综合考虑社会影响、工程造价、施工工期以及施工工艺等方面因素，本着“一次根治，不留后患”的设计原则，拟对采空区进行专项治理。拟对崑源煤矿小煤矿采空区、乾安煤矿采空区采用注浆充填法进行治疗，注浆充填法是在地表钻孔，通过注浆泵、注浆管，将具有充填、胶结性能的浆液注入采空区冒落带及裂隙带中，浆液经过固化，充填采空区冒落带并胶结岩层裂隙带，使浆液结石体对其上覆岩层形成支撑作用，保证路基的稳定。

二、考核指标

1. 预期目标

- (1) 分析并提出开采沉陷区动态预计模型及预测方法;
- (2) 分析并提出浅伏厚基岩采空区路基治理宽度及方案设计;
- (3) 研发采空区改性粉煤灰-风积砂灌注材料, 并提出灌注一体施工工艺和质量控制标准;
- (4) 建立采空区公路路基治理效果评价体系;
- (5) 形成公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南 1 项。

2. 主要技术经济指标 (具体的技术经济参数)

- (1) InSAR 精细化探测精度不低于 5mm, OCTEM 技术反演采空区形状、大小、高度等精度不低于 1m。
- (2) 全固废改性粉煤灰-风积砂灌注材料强度 $\geq 1.5\text{MPa}$; 体系收缩比小于 5%。

3. 经济和社会效益

(1) 经济效益分析

浅伏厚基岩采空区路基处治工程, 按照公路采空区处置技术细则, 岩层移动角为 70° , 根据研究成果可将移动角度增加到 $80^\circ\sim 90^\circ$ 之间, 通过少处置、少钻孔、少注浆的模式, 大面积降低处置费用, 考虑到后期的运营的安全与稳定, 综合处置费用降低不少于 20%。

(2) 社会和生态效益分析

本研究提出的改性粉煤灰-风积砂灌注材料, 原材料是工业固废, 降低了二氧化碳排放, 是低能绿色产品。同时, 其综合成本相对于传统水泥粉煤灰灌注材料, 根据使用规模成本又有望降低 20%。另外, 改性粉煤灰-风积砂灌注材料不仅无毒无害, 对环境无不良影响, 而且应用范围广, 耐腐蚀性强。改性粉煤灰-风积砂灌注材料的研发不仅能够提高灌注材料的使用寿命, 同时可减少处治费用。项目的实施不仅有利于促进和带动我省采空区处治相关产业的可持续发展, 而且通过制定相关行业标准, 实现在交通运输工程领域的综合利用工业级示范, 对于行业的发展具有重大的意义。

另外，通过本项目的实施，将有利于培养道路行业绿色可持续发展相关的研发专业人员和产业化技术骨干队伍，为新世纪进行人才储备，因此既能为我国尤其是我省高新技术的产业化提供高端人才，也能有效的缓解社会就业压力。

4.成果提供形式

- (1) 形成重载浅伏厚基岩采空区处治创新型成果；
- (2) 解决小窑采空区成套处治技术难题；
- (3) 减低工程造价、缩短工程周期、提升项目品质；
- (4) 培养一批复杂地质条件下采空区处治技术人才；
- (5) 形成采空区处治技术方案、工程实施指南 1 项；
- (6) 发表论文核心及以上论文 3~5 篇，申请发明专利 3~5 项；
- (7) 提交项目研究报告 1 项。

4. 其他考核指标

市厅级以上活动开展媒体宣传报道不少于 3 次，省级以上会议技术交流不少于 1 次。

三、项目年度计划内容及考核目标

年度	计划内容及考核目标（每栏限 125 字）
2026 年 3 月 -2026 年 6 月	完成研究区地质、采矿资料收集，开展 InSAR、LiDAR 等空天地一体化探测，完成数据初解译；启动全固废注浆材料室内配比试验，完成 10 组基础配比测试；搭建采空区数值模拟基础模型。提交《采空区初始探测报告》《材料配比初步试验报告》。
2026 年 7 月-2026 年 9 月	开展 OCTEM 物探及钻探验证，精准划定采空区边界；完成 30 组全固废注浆材料配比优化，测试 7d/28d 力学性能；开展浅伏厚基岩采空区沉陷机理室内物理模型试验（1:50），完成开挖工况模拟。提交《采空区精细化探测报告》《材料配比优化报告》。
2026 年 10 月 -2026 年 12 月	建立开采沉陷区动态预计模型，完成与实测数据对比校验；研究 70° / 82° 岩层移动角下治理范围数值模拟；完成注浆材料耐久性（干湿/冻融循环）试验；布设现场 GNSS 监测点，启动长期变形观测。提交《沉陷动态预计模型研究报告》。
2027 年 1 月-2027 年 3 月	开展 85° / 88° 岩层移动角工况数值模拟，完成治理宽度参数对比分析；优化全固废注浆材料（注浆孔/帷幕孔专用）配比，确定核心性能指标；完成定向钻探技术方案设计，开展现场试验段选址。提交《治理宽度参数优化分析报告》。
2027 年 4 月-2027 年 6 月	启动依托工程试验段施工，实施定向钻探 + 三维物探精准探测；开展膜袋快速封堵注浆工艺现场试验，优化施工参数；研究循环荷载下采空区路基动力响应，完成数值模拟基础分析。提交《试验段精准探测报告》《注浆工艺试验报告》。
2027 年 7 月-2027 年 9 月	完成试验段不同充填方式（全充填/墩台式等）施工；开展重载路基动力特性现场试验，采集荷载-变形数据；建立采空区处治效果初步评价体系，完成试验段阶段性检测（钻孔取芯 / 波速测试）。提交《路基动力特性试验报告》《试验段处治阶段性评价报告》。
2027 年 10 月 -2027 年 12 月	完成试验段处治效果综合检测与评价，优化处治技术方案；开展全固废注浆材料灌注一体施工工艺标准化研究；撰写专利申请文件（3-5 项）、核心论文初稿（3-5 篇）；启动《全固废注浆材料应用技术指南》编制。提交《试验段处治效果综合评价报告》。
2028 年 1 月-2028 年 3 月	完成研究成果集成与优化，完善沉陷模型、治理宽度标准、材料工艺及评价体系；定稿技术指南、施工工法；完成专利申报、论文修改发表；整理项目全套研究资料，编制总研究报告，组织项目验收准备。提交《项目总研究报告》及全套验收资料。

四、项目经费

项目总经费：119.8 万元

交通运输厅补助：19.8 万元

自筹资金：100 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	114.8	19.8
1. 设备费	17.8	5
(1) 购置设备费	0	
(2) 试制设备费	15	5
(3) 设备改造与租赁费	2.8	
2. 业务费	59	10
(4) 材料支出	30	10
(5) 测试化验实验加工支出	3	
(6) 燃料及动力支出	1	
(7) 差旅支出	6	
(8) 会议支出	4	
(9) 国际合作与交流支出	0	
(10) 出版/文献/信息传播/知识产权事务/ 印刷支出	15	
(11) 其他支出	0	
3. 劳务费	38	4.8
(12) 劳务性支出	30	4.8
(13) 咨询专家支出	8	
(二) 间接费用	5	
4. 管理费	3	
5. 绩效支出	2	
合 计	119.8	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）	
		（1）授权发明专利	1-2
		（2）实用新型	
		（3）外观设计	
		2.软件著作权授权数（项）	
		3.发表论文（篇）	
		（1）其中 SCI 索引收录数	
		（2）其中 EI 索引收录数	
		（3）其他	3-5
		4.著作（部）	
		5.制订标准数（项）	
		（1）国际标准	
		（2）国家标准	
		（3）行业标准	
		（4）地方标准	
		（5）企业标准	
		（6）科技报告	1
	其他成果	1.填补技术空白数	
		（1）国际	
		（2）国家	
		（3）省级	1
		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）	1
		（2）新产品（含农业新品种）	
		（3）新材料	1
		（4）新装备（装置）	
		（5）平台/基地/示范点	
		（6）中试线	
		（7）生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4. 研究开发情况	
		(1) 小试	是/否
		(2) 中试（样品样机）	是/否
		(3) 小批量	是/否
		(4) 规模化生产	是/否
	人才引育	1. 引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2. 培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	2
		3. 培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4. 是否设立科研助理岗位	是/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）	1200
		2. 新增销售（万元）	
		3. 新增出口创汇（万美元）	
		4. 新增利润（万元）	
	社会效益	1. 新增税收（万元）	
		2. 新增就业人数	
		3. 就业培训（人次）	
		4. 带动农民增收（万元）	
		5. 培训和指导科技服务（人次）	
		6. 新增产业带动情况	
		7. 技术集成示范（项）	
		8. 建立示范基地（亩数）	
		9. 节约资源能源	
		10. 环保效益	
其他需要说明的情况			

六、承担单位或研究人员分工

为确保项目高效推进、优势互补，项目组依据各参与单位的核心优势与资源禀赋，进行明确的任务分工。具体承担的主要工作如下：

项目承担单位：陕西大锦高速公路管理有限公司

总体协调与项目管理：作为项目第一责任单位，全面负责项目的申报、组织实施、进度控制、经费管理及总体协调工作。负责与陕西省交通运输厅的对接，落实项目配套经费与工程依托条件。

工程现场实施与保障：提供并保障大锦高速公路采空区路段作为项目研究的实体依托工程。负责组织现场试验段的施工协调、场地提供、安全监督与外部关系协调，确保科研活动与工程建设无缝衔接。

数据提供与现场监测：负责提供项目所需的完整工程设计资料、地质勘察报告、施工记录等基础数据。配合参与单位，组织开展现场 GNSS 监测、施工过程中数据采集及处治后的长期变形观测工作。

成果集成与工程转化：牵头组织项目研究成果在依托工程中的转化应用，负责将优化的设计方案、新材料、新工艺纳入施工管理流程。组织示范工程的打造与成果展示，推动技术标准的试点应用。

项目参加单位一：陕西交控建投经营管理有限公司

陕西交控建投经营管理有限公司，负责对省内新建、改扩建、特许经营等交通基础设施工程项目实施全面管理，以“行业需求、市场需求”为引领，深化工程技术创新与研发落地应用，延长交通基础设施产业链条，打造服务公路建设行业发展的“科技服务商、技术新高地”。

公司近年来针对工程技术重点、难点，开展原创性、前沿性科技攻关，固化形成一批成套关键技术成果。已发布实施交通运输行业标准 2 项、陕西省地方标准 35 项、团体标准 2 项；取得国家知识产权局专利证书 47 项，计算机软件著作权登记证书 25 项；获得国家科技进步奖一等奖 1 项、二等奖 3 项，陕西省科技进步一等奖 3 项、二等奖 25 项、三等奖 35 项，中国公路学会特等奖 1 项。目前，承担省交通运输厅《装配式桥梁绿色智能建造关键技术研究及产业化》等 10 余项科研项目研究任务。

项目参加单位二：山西省交通科学研究院集团有限公司

核心技术研发与攻关：充分发挥其在采空区治理领域的深厚积累，主导全固废注浆材料的配方优化、性能提升与产业化制备技术研究。负责新型注浆材料的室内配比试验、力学性能测试及耐久性评价。

灾变机理与模拟分析：主导浅伏厚基岩采空区沉陷机理、活化规律及治理优化理论研究。利用其先进的“黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室”及国家超算中心资源，负责开展大规模数值模拟分析（如 FLAC3D、UDEC 等），研究不同治理方案的力学响应，为优化设计提供理论依据。

室内模型试验：负责设计并实施几何相似比物理模型试验，模拟房柱式采空区从开挖、失稳到注浆处治的全过程，直观揭示灾变机制并验证处治效果。

技术标准与工法编制：凭借主编行业标准的经验，牵头负责《公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南》及相关施工工法的研究与起草工作。

项目参加单位三：陕西省交通规划设计研究院有限公司

精细化勘察技术集成与应用：主导“空天地”一体化综合探测技术的集成与应用方案研究。结合其工程勘察综合甲级资质和遥感技术应用经验，负责 InSAR、LiDAR、OCTEM 等多源数据的解译、融合与综合分析，精准划定采空区边界和危险区域。

处治方案优化设计与验证：基于数值模拟与理论研究成果，主导采空区治理宽度参数的工程化优化设计。负责将优化的岩层移动角、处治范围等研究成果转化为具体的施工图设计变更方案，并进行安全性与经济性复核。

工程效果评价体系构建：利用其在工程检测与评估方面的经验，参与构建采空区处治效果综合评价体系，研究并提出包括钻孔取芯、物探检测、变形监测在内的多维度验收与评价方法。

协同工作机制：三家单位将通过建立定期技术协调会、数据共享平台和联合现场工作组等形式，确保理论研究、技术研发、设计优化与工程实施紧密互动，形成“研-设-建”一体化的协同创新闭环，共同保障项目目标的实现。

七、项目参加人员表

项目承担单位：陕西大锦高速公路管理有限公司						
参与单位（排序）：陕西交控建设投资管理有限公司、山西交通科学研究院集团有限公司、陕西省交通规划设计研究院有限公司						
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	薛保勇	197709	陕西大锦高速公路管理有限公司	正高级/董事长	岩土工程	项目负责人
主要研究人员						
2	黄哲	197312	陕西大锦高速公路管理有限公司	高级工程师/总经理	桥梁工程	技术负责人
3	王丰年	198802	山西交通科学研究院集团有限公司	高级工程师/博士	岩土工程	课题负责人
4	张国庆	197810	陕西省交通规划设计研究院有限公司	高级工程师	桥梁工程	课题负责人
5	张文涛	198404	陕西大锦高速公路管理有限公司	高级工程师	公路工程	现场负责

6	尉茂森	198711	陕西大锦高速公路管理有限公司	高级工程师	岩土工程	现场协调	尉茂森
7	师永翔	198407	山西交通科学研究院集团有限公司	正高级/博士	岩土工程	技术负责人	师永翔
8	任怀斌	198309	陕西大锦高速公路管理有限公司	高级工程师	岩土工程	现场负责	任怀斌
9	刘斌	198805	陕西省交通规划设计研究院有限公司	高级工程师	岩土工程	技术负责人	刘斌
10	季博	199409	陕西大锦高速公路管理有限公司	工程师	土木工程	数据处理	季博
11	周子涵	199709	陕西大锦高速公路管理有限公司	工程师	桥梁工程	现场试验	周子涵
12	李泽玮	199408	山西交通科学研究院集团有限公司	工程师	岩土工程	数值模拟	李泽玮
13	董海裕	199707	山西交通科学研究院集团有限公司	工程师	地质工程	室内试验	董海裕
14	宋迪	199801	山西交通科学研究院集团有限公司	工程师	地球物理探测	数值模拟	宋迪
15	任宏玉	199606	山西交通科学研究院集团有限公司	工程师	地质工程	现场试验	任宏玉

八、信息表

项目合同编号		25-70K		密级		/		A: 机密 B: 秘密 C: 内部				
项目名称		重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术										
项目实施所在地		陕西榆林		起止年限		2026 年 3 月至 2028 年 3 月						
总 经 费		119.8 万元		厅 拨		19.8 万元						
第一承担单位	单位名称	陕西大锦高速公路管理有限公司										
	所在地	陕西省榆林市神木市						代码	/			
	通讯地址	陕西省榆林市神木市锦界镇锦绣大街孵化中心八号楼						邮编	719300			
	单位性质	(3) 1.大专院校 2.科研院所 3.企业 4.其他						代码	91610821MA70GA9L3A			
参与单位	序号	单 位 名 称										
	1	陕西交控建投经营管理有限公司										
	2	山西交通科学研究院集团有限公司										
	3	陕西省交通规划设计研究院有限公司										
项目负责人		姓 名	薛保勇		性别 (1) 1.男 2.女		出生年份		1977			
		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	(15829779996/0912-8606987)		电子邮箱		357272808@qq.com					
项目联系人		姓名	张文涛		性别		男					
		联系电话	(13571206752/0912-8606992)		电子邮箱		36822833@qq.com					
项目组人数		15	高级	9	中级	2	初级	0	其他	0		
主要研究内容 (100 字以内)		(1) 采空区精细化物理探测及残余变形特征研究; (2) 浅伏厚基岩采空区治理宽度参数优化及稳定性评价; (3) 采空区重载路基动力特性试验研究; (4) 房柱式采空区地下腔体体积探测及三维重建; (5) 全固废注浆材料研发及灌注一体工程应用。										
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、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 10 份，甲方单位 5 份，承担单位 5 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：

负责人：（签字）

联系人：（签字）

电 话：029-88869067



陕西省交通运输厅

2020年 3月27日

（公 章）

合同乙方：（承担单位）

单位负责人：（签字）

项目负责人：（签字）

电 话：

陕西大锦高速公路管理有限公司

2020年 3月27日

（公 章）



财务负责人：（签字）

账 户 名：陕西大锦高速公路管理有限公司

开户银行：工商银行神木迎宾路支行

账 号：2610091609200103468

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

年 月 日

项目编号: 25-70K

2025 年度陕西省交通运输厅科研项目 研究大纲

项目名称: 重载高速公路穿越采空区灾变响应及
精准处治关键技术

申请单位: (盖章) 陕西大锦高速公路管理有限
公司

联系人: 薛保勇

电 话: 15829779996

陕西省交通运输厅制

2026 年 3 月

填写说明

格式要求：目录页码齐全，双面打印，胶装不另加封皮。

可研报告可参考网评专家意见及建议，按照研究大纲深度编写。应用技术类应本着有限目标、有限规模、重点突出、适应市场、重在应用的原则，不求全求大、面面俱到。综合考虑研究期限、财力等实际情况，合理确定研究内容。软科学研究项目可研报告应由相关业务单位或部门牵头完成，内容要与业务工作紧密结合。

目录

一、 项目研究的背景和必要性	1
1.1 行业背景和严峻挑战	1
1.2 现有技术瓶颈与关键问题	2
1.3 项目研究的必要性	3
二、 前期科研及工作基础	4
2.1 国内外研究现状	4
2.1.1 基于遥感技术的采空区识别与监测研究现状	4
2.1.2 复杂采空区精细化勘察研究现状	7
2.1.3 采空区处治技术与效果评价技术研究现状	12
2.1.4 国内外类似工程案例	20
2.2 项目现有工作条件	23
2.2.1 项目前期工作基础	23
2.2.2 项目协作条件	26
2.3 参考文献	31
三、 研究内容及实施方案	39
3.1 拟解决的关键问题	39
3.2 主要研究内容及实施方案	41
3.3 技术路线	55
3.3.1 研究技术方案	55
3.3.2 工作流程	58
3.4 后续技术改造	59
3.4.1 与本项目依托工程的直接衔接与应用	60
3.4.2 对行业标准与规范体系的补充与提升	60
3.4.3 在陕西省及全国类似工程中的推广应用前景	61
3.4.4 推动相关产业技术升级与产业链延伸	61
3.5 技术经济指标	62
3.5.1 技术性能指标	62
3.5.2 技术经济性指标	63

四、项目承担单位及参加单位概况	64
4.1 单位概况	64
4.2 技术力量及人员构成	70
4.3 各自承担的主要工作	71
4.4 项目主要负责人情况	71
五、项目依托工程（工作）情况及其他必要支撑条件	74
5.1 依托工程（工作）概况	74
5.2 投资来源	76
5.3 工程进度与项目科研进度的配合	76
(1) 总体协同原则	76
(2) 分阶段具体配合方案	76
(3) 组织与制度保障	78
5.4 组织管理形式	79
5.4.1 组织结构与职责	79
5.4.2 运行与管理机制	80
5.4.3 与工程建设管理体系的融合	82
六、项目经费估算及资金筹措情况	83
七、项目绩效指标	84
八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益	86
8.1 预期目标	86
8.2 主要技术经济指标	86
8.3 经济和社会效益	86
(1) 经济效益分析	86
(2) 社会和生态效益分析	86
8.4 成果提供形式	87
九、其它需要说明的问题	87
十、申请单位意见	87

一、项目研究的背景和必要性

1.1 行业背景和严峻挑战

大锦高速路线 K0+923 ~ K4+430 段穿越锦源煤矿, 通过收集资料、工程地质调绘与采矿调查及初、详勘物探、钻探验证, 确定采空区特征如下:

路线 K2+913 ~ K2+985 段下方及附近有原私采小煤窑的采空区分布, 线路以路基形式通过。经走访朱盖沟居民, 该处确系本村村民早前农闲时采掘煤层所为, 煤层厚度小, 开采范围不大。小煤窑开采 2-2 上煤层, 层底板标高 +1116 ~ +1118m, 采空区埋深 7.8 ~ 12.6m, 煤层平均厚度 1.6m, 现巷道内有碎块石土充填, 采深采厚比 5.3 ~ 7, 回采率约 15%, 目前剩余空隙率约 30%。政府已于 2013 年炸塌封闭洞口。

拟建高速公路 K10+774 ~ K11+272 段经过乾安等煤矿, 根据勘察成果, 其中 K10+835 ~ K12+000 下部存在小煤窑采空区, 开采方式为平硐房柱式炮采, 顶板基本无支护, 回采率约 50%。开采的 1-2 上煤层厚度 2.2 ~ 3.8m, 平均开采厚度约 2.6m, 水平状。顶板为灰白色砂岩, 属软弱覆岩。底板为深灰色砂质泥岩、泥质砂岩, 采空区无充填。采空区底板标高 +1112 ~ +1133m, 埋深 15.2 ~ 69.0m, 空洞高度 2.0 ~ 3.8m, 采深采厚比 6.3 ~ 34.5, 属于浅层采空区。停采时间超过 7 年, 属于老采空区, 地面变形不明显, 目前剩余空隙率约 75%。采空区内主要构造物有主线路基、孙家岔互通式立交 (含匝道)、K0+739.594 被交线柳袁路上跨主线分离式立交桥、柳袁路改路等。

我国煤炭资源丰富且分布广泛,长期大规模的煤炭开采形成了大量地下采空区。随着国家交通路网向资源富集区延伸,高速公路穿越采空区已成为常态。采空区作为一种特殊的不良地质条件,具有隐蔽性强、空间分布复杂、稳定性差等特点。若处治不当,极易引发路面沉陷、路基开裂、隧道结构破坏甚至塌方等灾难性后果,严重威胁公路建设稳定性及运营安全,并大幅增加全生命周期的维修养护成本。例如:我国成渝高速巴岳山隧道、都汶高速炮台山隧道等多个工程在穿越煤层及采空区时曾发生安全事故,损失惨重。特别是对于重载高速公路而言,高频次、大吨位的车辆荷载会产生强烈的动力冲击效应,极易诱发老采空区覆岩的“活化”现象,导致地表二次移动变形。这种“路-矿”耦合灾害机理复杂,传统处治技术难以完全适应重载交通下的长期稳定性要求,已成为制约矿区交通基础设施高质量发展的关键瓶颈。

1.2 现有技术瓶颈与关键问题

尽管近年来遥感、物探及注浆技术有所发展,但在重载高速公路穿越复杂采空区的实际应用中,仍存在以下亟待解决的关键技术问题:

复杂环境下探测精度与可靠性不足:现有“空-天-地”探测技术在面对剧烈形变区和强电磁干扰环境(如邻近铁路、高压线)时存在局限性。传统 InSAR 相位解缠算法在高梯度形变区易失效,导致监测数据不连续;常规瞬变电磁法在强干扰下信噪比低,难以精准识别浅层小煤窑采空区边界。如何实现多源数据融合探测,提高复杂工况下的识别精度,是精准处治的前提。

注浆材料长期耐久性机理不明：目前全固废类注浆材料虽已应用，但对其微观结构演变规律缺乏深入表征（如 SEM/XRD 微观测试不足），材料在地下复杂环境中的长期耐久性（如 3 年以上）缺乏系统性观测数据支撑。材料性能的不确定性直接影响处治工程的百年大计。

重载荷载下灾变响应机制不清：现有研究多侧重于静力条件下的采空区稳定性，缺乏针对重载高速交通荷载循环作用及高 - 低温环境耦合下的路基冲击动力特性研究。采空区“活化”与重载交通的耦合灾变机理尚不明确，导致处治设计缺乏理论依据。

全周期安全防控体系缺失：当前采空区治理多重于“处治”而轻于“防控”，缺乏集“实时监测 - 智能预警 - 应急处理”于一体的三位一体防控体系。难以实现从施工期到运营期的全周期动态管控，无法有效应对突发性灾变风险。

1.3 项目研究的必要性

本项目依托大锦高速公路穿越砬源煤矿、乾安煤矿等典型复杂采空区工程，开展重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术研究，具有极大的必要性和紧迫性：

保障重载高速公路运营安全的迫切需要：针对项目沿线浅层老采空区剩余空隙率大、覆岩稳定性差的特点，通过研究灾变响应机制并建立三位一体防控体系，可有效避免采空区“活化”导致的路基沉降与结构破坏，确保重载车辆运行安全，杜绝重特大安全事故发生。

突破采空区精准处治技术瓶颈的关键举措：本项目拟通过优化

D-InSAR 与 PS-InSAR 组合监测方案、引入物探抗干扰模块、加强材料微观表征及长期耐久性观测,将显著提升采空区探测精度与处治材料可靠性。研究成果将填补重载交通下采空区动力响应研究的空白,推动行业技术升级。

实现经济效益与社会效益双赢的重要途径:本着“一次根治,不留后患”的原则,通过优化处治方案与研发全固废注浆材料,可在确保工程质量的前提下降低处治成本,减少后期养护投入。同时,项目成果将为国内穿越采空区公路建设提供可复制的示范样板,具有重要的推广价值和显著的社会效益。

综上所述,开展本项目研究不仅是解决大锦高速公路实际工程难题的需要,更是提升我国公路交通采空区处置技术范畴、引领行业建养技术升级的战略需求。

二、前期科研及工作基础

2.1 国内外研究现状

2.1.1 基于遥感技术的采空区识别与监测研究现状

(1) InSAR 技术发展研究现状

InSAR 技术及其衍生技术(D-InSAR、PS-InSAR、SBAS-InSAR)自上世纪 90 年代以来在地面形变监测领域取得显著进展。这些技术成本低廉、监测范围广泛,能够实现全天候监测,并在城市沉降、矿区沉降及建筑物形变监测等多个领域得到广泛应用,实现厘米至毫米级别的监测精度。D-InSAR 技术的理论精度可达厘米级,但受大气效应影响,实际精度有时降至数十厘米。为克服这一挑战,21 世纪初

期发展了时间序列 InSAR 技术,其中 PS-InSAR 和 SBAS-InSAR 技术成为主流。PS-InSAR 技术由 Ferretti 等人在 2000 年和 2001 年提出,主要通过分析 SAR 图像中散射特性稳定的人工建筑物和裸岩等点目标,PS-InSAR 技术能够提取出目标物的形变量,从而得到整个研究区域内的地表形变场。BAS-InSAR(小基线子集干涉测量)技术则由 Berardino 等人于 2001 年以及 Sansosti 等人于 2004 年首次提出。其基本原理是通过适当组合选取的大量 SAR 数据中短空间基线的像对,计算这些组合的多视干涉图,以生成平均形变速度图或地表形变的时间序列。

我国自 21 世纪初开始引进 InSAR 技术,并在随后的十几年得到快速发展。杨吕珍(2009)、芮勇勤等(2010)融合 InSAR 与 GPS 技术对河南省境内禹州-登封高速公路采空区路基变形进行监测,并用水准数据进行验证,证实其可靠性较高。师红云等(2014)、杨采臣(2015)、刘冰等(2018)利用时序 InSAR 方法处理了不同波段的雷达数据,获得了矿区、城区以及郊区不同位置的城铁、高速公路等线性目标的沉降速率,精度较高,并分析了产生沉降的原因。此外,利用时序 InSAR 技术监测城市地面沉降已作为一项成熟的技术在各大城市得到了广泛应用。王琪(2014)、刘鹏等(2016)、高二涛等(2019)分别利用时序 InSAR 技术计算得到了太原、天津、南京等地近年来的地面沉降量,并对地下水开采对地面沉降造成的影响进行了着重分析。

(2) 基于遥感数据的地质灾害调查现状

采空区地质灾害主要包括地面沉降、地裂缝和地面塌陷。InSAR 技术已广泛应用于地面沉降的调查,遥感图像解译则用于地裂缝和地面塌陷的调查,为采空区地质灾害调查提供优质服务。在遥感图像地质灾害调查方面,我国从上世纪 80 年代开始,在多个大型水电站库区进行了航空影像地质灾害调查,为工程可行性提供基础资料。随后在铁路沿线和公路选线防灾工程中,也使用了基于遥感影像的地质灾害调查技术,取得了地质灾害分布图等成果。在卫星遥感影像应用方面,朱娇利用 DEM 数据和高分一号卫星数据进行滑坡信息提取和分类研究,提出了高效提取地质灾害信息的思路。于博文等利用高分 1 号数据进行了京津冀地区的矿山遥感监测研究,为矿产资源规划和矿山环境治理提供技术支持。张建永等利用高分一号卫星和航空伽马能谱测量资料进行多源异构融合,取得了最佳地质应用效果。刘智等利用高分一号卫星数据进行地质构造解译,解译出新增断裂 418 条,为偏远地区地质地貌研究提供了帮助。

(3) 公路采空区风险评价方法研究现状

安全性分析与评价的方法包括模糊理论、层次分析和 Petri 网等。R.Aleotti 和 P.Baldelli 在 2000 年分析了 Piedmont 地区不同特点和类型的地质灾害,通过叠加和统计评估了灾害的危险性和脆弱性,并总结了地质灾害制图经验。2001 年, A.Uromeihy 等人利用模糊理论和隶属度函数对地质灾害区域进行模糊综合计算,完成了地质灾害分区。2004 年, R.Pallas 等通过遥感解译确定了尼加拉瓜西北地区地质灾害的特征和可能性。2016 年, 屈飞行等基于层次分析原理对比了不同

权重计算方法评价地质灾害的准确率。2017年,黄光球等采用状态Petri网评价矿区生态环境,证明了其可行性。2018年,于博文等利用高分一号对地质灾害进行解译,通过层次分析法和加权平均法得到综合评价图,精度达到78%。

2.1.2 复杂采空区精细化勘察研究现状

15至16世纪,人们已认识到开采沉陷的影响。开采沉陷理论是采空区变形与安全性评价的代表性成果,经历了三个阶段的发展。第一阶段是垂线理论,用于确定采空区开采破坏的影响范围。第二阶段是沉陷几何理论,提出了连续分布的影响函数和地表沉降方程。第三阶段是数学模型预测,包括理论模型法、分布函数法、经验方法等。20世纪末,随着计算机技术的发展,数值方法逐步用于采空区沉陷变形的研究,其中有限差分法的应用最为广泛,且不少学者使用FLAC系统软件来研究采空区的地表沉陷和变形规律。我国煤矿采空区治理工作已有近30年历史,在采空区勘察方法、变形预测、稳定性评价等方面所取得了一些成果,制定了《煤矿采空区岩土工程勘察规范》(GB 51044-2014)、《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG/T D31-03-2011)等规范,为当前的采空区勘察设计工作提供了一定指导,我国的采空区治理研究及规范制定大致经历了如下历史阶段。

(1) 太旧高速公路采空区科研攻关

1993-1997年,山西省交通厅成立科研课题组,针对我国第一条高速公路下伏采空区隐蔽灾害问题,研究高等级公路路基下伏空洞的危害程度勘察、处治及质量检验技术。经过5年研究,课题组构建了

不同地质采矿条件下的工程地质模型,提出了勘察工作程序、物探最佳组合方法,研究了采空区稳定性评价方法,并初步提出了处治界限标准。这些技术成果系统性强,实用价值高,达到国内领先和国际先进水平,目前研究成果在多条高速公路建设中得到推广应用。

(2) 《采空区公路设计与施工技术细则》制定与发布

我国煤矿地质条件复杂、采空区类型多样,科技工作者在物探方法、残余变形预测、地基稳定性评价等方面进行了探索。2008-2011年,山西省交通规划勘察设计院总结了近20年来采空区公路设计与处治经验,主编了《采空区公路设计与施工技术细则》,规范了勘察技术活动,提高了勘察成果质量。该规范规定了勘察技术要求、报告编写内容、稳定性评价标准和井下测量及工后质量验收标准,结合了我国采空区公路建设的实际情况,为其他行业采空区勘察工作提供了主要技术依据。中国铁路设计集团有限公司也开展了铁路、公路采空区勘察设计工作,编制了《采空区工程地质勘察设计实用手册》,附录中引用了相关规程中的参数表和算例,实用性较强。铁路行业的技术成果被编入了《铁路隧道设计规范》、《铁路瓦斯隧道技术规范》和《铁路工程不良地质勘察规程》。

(3) 《煤矿采空区岩土工程勘察规范》制定与发布

随着国家城镇化进程加快,乌鲁木齐、平顶山等矿业型城市将城市郊区(县)煤矿采空区逐步发展为城市建设中心,城市发展与煤矿采空区之间的矛盾日益突出,大量工业与民用建筑无法避让采空区。根据我国土木工程行业特点,2014年中国煤炭建设协会主编、住房

和城乡建设部发布了《煤矿采空区岩土工程勘察规范》。与《采空区公路设计与施工技术细则》相比,该规范针对一般土木工程项目,增加了采动边坡勘察与稳定性计算内容,完善了施工勘察技术要求,突出小煤窑采空区勘察技术难点,归纳总结采空区稳定性评价的各种方法(开采条件判别法、极限平衡法、概率积分法、数值计算法等),增加了采空区场地工程建设适宜性评价内容,提出采空区场地建筑设计、结构与工程治理的综合防治措施规定。该阶段对采空区勘察与评价认识更加全面与系统,尤其是将采空区处治与地面建筑抗变形设计统筹考虑,是一种务实的处理方法。

(4) 《采空塌陷勘查规范》制定与发布

《采空塌陷勘查规范》是中国地质灾害防治工程行业协会组织、中煤科工集团西安研究院有限公司主编的标准,于2018年发布。该规范旨在防治采空塌陷灾害,对煤矿等地下资源开采形成的采空区可能造成的危害进行了详细规定,包括不同勘查阶段的基础性工作、钻探探查验证目的与技术要点、稳定性评价等。同时,规范还纠正了勘察行业中存在的不规范做法,使采空区勘察与评价工作更加务实,回归到基本的工程地质问题中。在规范指导下,已开展了多项重大工程的采空区勘察工作。

(5) 重大工程的建设有力地推动勘察技术进步

为应对重大工程建设中的采空区勘察挑战,需不断引进与研究新的勘察方法,提高精度与效率。在亭口水库和子长红石砬水库的采空区处理中,渗漏与渗透破坏是关键问题。勘察中运用压水试验、抽水

试验、电测井等手段来查明地层渗透特性，估算渗透系数。合凤高速小河沟特大桥的采空区勘察则采用钻探绳索取心、VSP地震勘探、多参数测井等技术，精细识别地层中的采动裂隙分布，确定钻进层位。济宁任城区的采煤沉陷区开发中，采用高密度三维地震勘探、VSP勘探等物探方法，查明地层裂隙发育、各向异性及裂隙密度与主应力场，为注浆方案和场地采空区变形控制提供技术依据。宝日希勒露天煤矿采空区勘察中运用孔内激光扫描技术，精确测量地下残余空洞位置与范围，减少地面钻探工程量，节省投资。HJD隧道变形研究中采用CPIII高精度监测技术与装备，捕捉轨道变形矢量，为研究采矿活动与隧道变形关系提供直接证据。这些新方法加深了对采空区覆岩精细结构、毫米级残余变形、采动覆岩强度等特性的认识。

采空区勘察面临的主要问题：

1. 勘察大纲编制指导性不强。勘察大纲是采空区勘察的基础性和指导性文件，应重视现场踏勘、深入研究工程问题、全面认识工程地质条件，并选择适当的物探方法和验证钻孔。勘察大纲应经过专家咨询和评审，确保其严谨性和指导性。

2. 钻探技术要求与采空区勘察工作结合不够紧密。由于历史和体制原因，钻探技术队伍需要结合采空区勘察的实际情况，准确观测冲洗液消耗量和记录掉钻信息，提高岩心鉴定和地质编录的针对性。

3. 物探成果难以满足工程勘察需求。由于科研氛围、市场环境和技术水平等因素的影响，物探成果可靠度和可信度总体偏低，存在多解性和模糊性，难以满足工程建设的实际需求。

4. 勘察成果综合分析不够深入。地下采空区类型、分布和范围复杂, 需要加强电法、地震等物探成果的对比解释与综合分析, 提高勘察成果准确性, 全面系统地总结和分析各种勘察成果。

5. 采空区场地特殊岩土问题研究不足。对于场地稳定性要求严格的采空区, 需要采用数值计算方法预测残余变形, 并考虑长期时间效应。对于特殊岩土工程问题, 需要遵循一般性原则, 并结合特殊的工程条件和地质环境开展工作。

(6) 钻孔摄像技术在精细化勘察中的应用

钻孔摄像技术应用在地质、岩土以及采矿工程和冰川研究等等行业中越来越广泛。在各类岩土工程中, 通过钻孔岩芯测定法对岩体结构完整性进行探测, 这为工程人员数据获取提供了关键技术。若遇到特殊和复杂的地质条件, 如遇到软弱岩体、破碎岩体以及采空区等, 再加上钻探技术的影响, 对造成该方法计算结果存在误差。数字钻孔摄像技术是通过电子技术、视频技术以及数字技术集计算机应用技术为一体, 可以避免上述影响, 钻孔内完整性的信息采集也更精确。

王宏志在长壁工作面开采区内采用地面窥视钻孔的技术, 分析了受采动影响其破坏特征与覆岩活动规律的相互关系, 并结合了理论分析、数值模拟、物理相似模拟及现场实测等相应的研究方法, 对受钻孔影响的采动破坏与覆岩活动进行了系统研究, 揭示了受采动影响的覆岩破坏特征以及钻孔内壁的时空演化过程。于钟博等研究了顶板为厚松散层条件薄基岩经过上分层开采后, 通过钻孔窥视技术对形成的垮落带和导水断裂带两带的高度进行了相应的比对和深入的探究。对

钻孔不同位置的图像与该钻孔煤层顶板埋深相对比下,得到垮落带及导水断裂带的高度。王川婴通过钻孔摄像技术得到岩体内部的结构特性,并提出一种评价岩体完整性指数的新方法。将此方法在现场实践中开展了一系列的实验过程,并采用数字钻孔摄像技术,对工程地质中钻孔进行勘探。结果表明 RMDI 法能实现全孔段或局部孔段的完整性评价。聂百胜等通过一种前视钻孔窥视视频来提取钻孔各参数的方法,定量获取钻孔中裂隙数量、方向、倾角等信息。刘贵祥基于全景数字钻孔摄像技术,通过对采场围岩进行观测,探究其相应的运动规律,对工程地质的安全高效生产具有重要意义。进一步将全景数字钻孔摄像技术运用在现场实践当中,取得了满意的效果。康红普通过光导纤维、前视电子、以及数字式全景钻孔窥视仪在特定环境的矿井钻孔中应用,得出了对应图像并且对煤岩体中钻孔的结构面形态及分布进行分析,表明该技术适用于采矿工程中,可对煤岩体完整性进行评价。郭浩森根据钻孔摄像全景图建立岩体完整性评价方法

(RMIBT),实现了深埋硬岩隧洞围岩完整性动态评价,揭示了深埋硬岩隧洞破裂区演化及其分区破裂机理,提出了深部硬岩隧洞破裂区破裂程度评价方法(RMIBT-Z),该方法可用于不同结构面产状和由于高应力取芯破碎情况下的深部岩体完整性评价。

2.1.3 采空区处治技术与效果评价技术研究现状

(1) 采空区设计处治技术研究现状

过去几十年,国内外对“三下”采空区问题进行了大量研究,尤其在变形破坏和地表移动规律方面成果丰富。然而,关于采空区对道

路、铁路、桥隧等交通基础设施的变形和灾害问题研究相对较少。国外从20世纪80年代开始研究采空区对公路的危害,但研究不够系统。近年来,随着我国高速公路的大规模建设和运营,这方面研究逐渐受到重视。

关于采空区对高速公路的影响及其机理,多位研究者得出了不同的结论。Marulander等研究了高速公路与采空区相对空间位置对高速公路的影响机制。Skernpton认为采空区的残余沉降可能导致低洼路段积水,威胁行车安全。梁尧麓指出采空区高速公路路基的承载能力较未采动区域下降30%~60%。周维垣发现地表曲率变形会使路面呈波浪状,并给出了相应的容许曲率值。秦四清分析了老采空区对高速公路的三个方面影响。童立元总结了多种工况下老采空区与高速公路的相互作用规律。Scheidegger和Tong研究发现开采沉陷导致路基路面离层和附加剪应力,可能导致路面破裂和边坡失稳。范洪冬提出了基于时序SAR技术的采空区高速公路变形监测及预测方法。邓伟男模拟揭示了采动对路基、路面的破坏规律。

目前,关于采空区对高速交通基础设施的危害研究主要基于开采沉陷理论,以实际工程为背景,但缺乏系统总结。关于采空地基与交通基础设施的相互作用,很少考虑交通动力荷载的影响,也缺少相应的分析方法。

采空区的治理方法包括强夯法、注浆治理、崩落法和剥离治理法。李文等总结了浅埋煤层房采采空区的治理技术,分析了各治理技术的优缺点和适用条件。张胜等应用强夯法治理浅层小煤窑采空区,杨和

平等针对膨胀土地地区下伏中浅埋采空区采用强夯法与加筋技术加固高速公路路基。童立元等研究了注浆法治理高速公路下伏采空区的相关问题。张志沛等分析了煤矿采空区地面注浆技术的特点,提出了注浆治理存在的问题及解决方法。潘立文等介绍了全胶结注浆法在煤矿采空区治理中的应用。张刚艳以多层倾斜采空区为例,论证了采空区治理的优先级和合理的浆液配合比。李晓红等研究了隧道采空区的处理原则和技术,提出应根据采空区和隧道空间位置关系选择治理措施。

综上所述,尽管对采空区问题已有一定研究,但仍需加强交通基础设施变形和灾害问题的研究,并考虑交通动力荷载的影响。同时,需要进一步完善采空区治理方法和技术。

1) 采空区变形规律研究现状

煤炭是我国基础能源,占一次能源结构约 60%,对国民经济发展至关重要。近年来,我国煤炭年产量占全球一半。我国有 426 座矿业城市(镇),其中 150 座为煤炭城市(镇)。井工开采占比超过 95%,导致地面塌陷问题严重,采煤沉陷区分布广泛。2017 年数据显示,我国采煤沉陷面积已达 20000km^2 ,并以每年 700km^2 的速度增长,部分城市沉陷面积超过总面积的 10%,涉及建设用地 $4500 \sim 5000\text{km}^2$,影响约 2000 万人口。目前,我国高速公路总里程达 16 万公里,位居世界之首。煤炭开采形成的采空区会对上覆岩体产生复杂变形与破坏,影响高速公路安全。

随着高速公路网的不断加密,穿越煤矿采空区的情况日益增多,关于采空区变形与治理的研究也逐渐深入。早在 15 世纪的比利时,

就开始了对煤炭采空区变形规律和地表位移的研究,并颁布了相关法令来限制采空区的开采。而 1895 年德国发生的采空区塌陷事件,使得采空区变形问题引起了学界的广泛关注。邓喀中等人利用相似材料模型,研究了重复采动后采空区上覆岩体的变化规律,并对比了破裂岩体碎胀系数的变化。张冬至等人则通过相似材料模拟模型,比较了采空区中部与边界膨胀系数的关系。郭广礼等人则基于大量案例,提出了老采空区岩石的变形性质,并对不同类型的岩体破坏特征进行了对比分析。钱鸣高等人采用相似材料模拟和数值模拟方法,发现了采空区离层裂隙区为“O”型。张永波和崔海英则通过大量相似性物理模拟,深入研究了采空区的四种破坏类型。此外,Choi 利用沉陷曲线发现了“完全位移区”,认为采空区煤柱荷载分布控制着地表开采沉陷曲线的形态。而 Singh 等人则考虑了均质层状覆岩的性质,通过模型提出了压力拱角(abutment angle)的理论。

在国内外学者的研究基础上,采空区的理论研究从“法线理论”、“自然斜面理论”到“圆拱形理论”不断完善。钱鸣高提出的“关键层理论”认为采沉陷是块体运动和散体运动的综合结果。阿维尔申的“三带理论”将采空区上方岩层移动分为冒落带、裂隙带和弯曲带。宋振骐提出传递岩梁假说,吴立新提出托板控制理论。现有理论认为采空区变形时大致规律是在垂直方向发育三带,水平方向发育三种结构。对于高速公路下伏采空区,剩余变形和“活化”是影响安全的关键因素。研究采空区残余变形和“活化”的方法包括理论计算、不连续变形研究、D-InSAR、InSAR、地面变形监测等。对于长壁式废弃

采空区, 变形特点进行了细致研究。建立了空间-天空-地表综合监测系统研究地表变形和裂缝演化特征。利用 InSAR 和 GRACE 研究了采空区的变形规律。室内实验与理论分析研究了采空区填充后的受力状态。长期变形监测数据研究了长臂式采煤煤柱的变化特征。理论分析和数值模拟方法分析了浅埋采场的变形变化规律。牵引伸缩器研究了采空区变形特征与裂隙发育规律。长壁开采过程中, 覆岩层逐渐演化为大“拱形结构”和小“拱形结构”。对于老采空区“活化”规律的深入研究具有重要意义。尽管采空区分布规律的研究已有一定历史, 但临空面覆岩的变化规律与老采空区“活化”规律的区别研究仍较少。随着采空区数量增加, 深入研究老采空区离层的“活化”变形具有重要意义。

2) 采空区稳定性研究现状

高速公路关心采空区变形和其对公路安全的影响。现有估算采空区变形和稳定性的方法包括: ①规范推荐观测法, 用地表移动变动值等方法确定采空区稳定性。②基于经验公式的剖面函数法和典型曲线法, 通过地表下沉盆地形状计算地表残余变形。③基于随机介质理论的概率积分方法, 需长期变形观测数据计算参数。④影响函数法, 分不同阶段和类型用半理论公式计算。⑤连续介质法, 用断裂理论等公式计算采空区变形。⑥数值模拟方法, 包括离散单元法、有限元分析等, 通过建立数学模型分析受力状态和稳定性。⑦相似性物理模拟法, 建立等比例缩小模型研究变形规律。数值模拟和相似性材料法在采空区变形规律研究中有优势。Zhao 等用长梁理论和数值模拟预测了采

空区稳定性。

众多学者利用 7 种主流方法,对采空区治理进行了深入研究。梁凯夏探讨了高速铁路穿越采空区所需的治理范围。郭庆彪等运用灰色关联度法分析了埋深、建筑物扰动深度、停采时间三个关键参数对采空区的影响。陈尚波和杨双有采用 FLAC3D 软件研究了采空区的稳定性与变形特征。张慧敏研究了采空区的失稳机制。王永增等利用 CDEM 模型分析了采空区的稳定性。张杰等结合砌体梁理论与 UDEC 软件,探究了双拱桥采空区的稳定性和受力状态。王华玲分析了不同位置采空区对隧道的影响。Yuan 等运用 PFC3D 软件模拟了矸石堆积不均对受力状态与稳定性的影响。Yadav 等结合 FLAC3D 与单轴压缩试验,研究了采空区的压实过程。Pang 等使用 FLAC3D 分析了采空区充填前后的应力变化。Zhao 和 Zhu 利用 GPS 与 FLAC3D 研究了倾斜煤层导致的地面沉陷过程。Guo 等采用层次分析法评估了高速公路穿越采空区的风险。Cai 等结合数值模拟、钻井、物探等手段,研究了高速公路穿越多层采空区的稳定性。Du 等探讨了采空区变形对高速公路的影响。Wang 等利用 Voronoi 多边形计算了采空区的变形量。Rezaei 利用最小势能理论评估了采空区的稳定性。

采空区变形受上层多层覆岩影响,覆岩系统复杂非均质,简单计算难以掌握其变形规律。相似性材料模拟是利用扩大或缩小模型模拟原型运动与力学特征的试验方法。通过此方法,学者研究了采空区稳定性与变化规律,较好地分析了非均质体变形规律与受力情况。Fang 等利用旋转相似性试验平台研究了不同倾角采空区变形规律。Meng

等利用相似性物理模型研究了采空区变形与渗透性变化规律。Wang 等利用相似性物理模型研究了采空沉降规律。Li 等利用数值模拟、SAR、相似性物理试验研究了地表沉降变形拐点。Cao 等利用相似性物理试验预测了采空区沉降。研究采空区稳定性是治理的必要条件, 基于稳定性分析选择合理治理方式是主流方法。

3) 采空区治理技术研究

《采空区公路设计与施工技术细则》(JTGT D31-03-2011) 规定了六种采空区治理技术, 包括注浆法、干砌支撑法、开挖回填法、强夯法、巷道加固法和跨越法。注浆法因施工条件要求较低, 成为目前的主流方法。注浆技术在工程领域广泛应用, 多位学者研究了注浆技术的不同方面, 如注浆充填率、注浆注意事项、注浆材料可行性、注浆效果检测、断层突水治理、多层倾斜煤矿采空区注浆技术等。注浆浆液有多种扩散方式, 学者们对渗透注浆、劈裂注浆、压密注浆、电动力学注浆、振动注浆等理论进行了研究。此外, 还有学者研究了注浆导致的裂隙开度变化、注浆前后采空区物性变化特征、浆液劈裂作用、浆液析水作用下的扩散模型、浆液结石体的加固作用等。同时, 也有研究关注回填煤矸石对地面变形的治理、灌浆实体强度的计算和治理范围的计算等。最后, 还有学者利用自己开发的 3D geoengineering 模型研究了不同压力下的注浆效果。

尽管学者已对注浆治理采空区进行了大量研究, 但当前对采空区不同位置注浆治理效果与保障上方构筑物安全条件下治理注浆治理范围的研究仍较少。研究浆液注入后对采空区的加固效果对治理效果

有重要意义。注浆治理采空区会遇到确定治理范围的问题。当前研究包括注浆治理宽度与埋深的正态分布关系变化,以及采空区注浆形成的墩台受力状态。高速公路采空区治理范围确定公式来自于开采沉陷学的研究。目前设计思路是将路基保护带边界视为地表移动盆地的危险移动边界反推可能影响到路基保护带的采空区,形成一个梯形治理范围。但当前研究中忽略了浆液结石体对变形的遏制作用,以及采空区“活化”规律与开采沉陷规律差异的研究。

(2) 全固废类注浆材料研究现状

现代注浆材料起源于 19 世纪初的法国,其发展可分为四个阶段:原始泥浆、水泥基、化学注浆和现代注浆材料。法国工程师查理斯·佩瑞格尼于 1802 年首次使用粘土和石灰制成的浆液,为注浆材料的开端。1826 年,英国工程师安普丁发明了普通硅酸盐水泥,成为广泛使用的注浆材料。1938 年,法国工程师科林首次应用水泥浆液加固大坝地基。随着工程要求提高,化学注浆和超细水泥成为研究重点。1920 年,德国尤斯登开创了化学注浆,使用水玻璃与氯化钙作为注浆材料。20 世纪 50 年代,美国研制出低粘度、凝结时间可调的丙烯酰胺类树脂浆液。然而,化学注浆材料因毒性问题受到限制,日本开始研究超细水泥。同时,水玻璃因性能良好、无污染而受到欢迎。近年来,地下工程对注浆材料需求增加,人们开始研究绿色注浆材料,如利用工业废渣制成新一代注浆材料。

我国现代注浆技术起步于上世纪 50 年代。1953 年,硅化法首次用于林西等地工程的注浆加固。1960 年,山东济宁一号井的涌水井

壁首次采用水玻璃-铝酸钠注浆材料处理,涌水量为 $30.6\text{m}^3/\text{h}$,为我国化学注浆材料处理的开端。1964年,广州化学研究所研制出丙烯酰胺类化学注浆材料,第二年投入实际应用,标志着我国化学注浆材料的重大进展。之后,我国陆续研发并应用硅酸盐系列、甲基丙烯酸系列等十种化学注浆材料,其中甲基丙烯酸系列为我国独创。对于粘土类浆液,我国也有深入研究,武汉长江水利水电学院在此领域取得重要经验。1985年,东北工程学院研究粘土水泥注浆材料在建井工程中的应用,1988年在山东三山岛金矿取得堵水加固的理想效果。1995年,铁道科学研究院西南分院为解决水泥-水玻璃注浆材料的缺陷,成功研制出利用膨胀剂铝粉等的外掺剂,取得室内外应用的理想效果,并于2000年获得国家专利。我国超细水泥注浆材料的研究和应用也发展迅速,三峡大坝工程就是其应用实例。减少水泥用量并多利用工业废渣的注浆材料是国际注浆行业的重要研究方向,也是我国注浆材料的重要发展方向。

2.1.4 国内外类似工程案例

搜集国内公路下伏采空区治理情况如下表2.1。显见主要以水泥粉煤灰全充填注浆法为主,生产中也有水泥粘土或水泥黄土浆液使用情况,但使用并不广泛。山西太古高速采空治理提出改变路基路面结构,在路基底层下加铺专用土工格栅,潭邵高速公路岩溶与采空区治理工程中使用了片石充填、注浆充填、路面连续配筋砼板跨越补强处理措施,值得注意。

表2.1 国内公路下伏采空区治理情况一览表

工程名称	采空区规模		治理方法	材料选择
	采深	采厚		
潭邵高速公路岩溶与采空区治理	10-18	1.4-3.0	片石充填注浆充填、路面连续配筋砼板跨越补强处理	片石、水泥浆液与连续配筋砼板
晋一焦高速公路	20-100	2.0-6.0	注浆充填	水泥粉煤灰浆液
太旧高速公路柏井冶西采空区治理	60-140	4-8	洞内干砌或浆砌片石，注浆充填	水泥粘土浆液，水泥粉煤灰浆液
包西线神木至延安	20-30	0.7-1.5	注浆充填	水泥黄土砂浆液
乌-全高速公路	30-50	0.7-3.0	注浆充填	水泥黄土浆液
山西太古公路	2-76	2-2.4	铺筑土工格室	专用土工格室
太长高速公路	180	5-6	注浆充填	水泥粉煤灰浆液
常吉高速公路	2-8	3-7.8	强夯置换	块石
锦阜高速公路	9-64	2.3-3.5	注浆充填	砂、粉煤灰、水泥
河北保阜公路	25-48	3.8	注浆充填	水泥粉煤灰浆液
京-福高速公路	33-89	1.0-2.0	注浆充填	水泥粉煤灰浆液
禹-登高速公路	11-67	4-8	全充填压力注浆法	水泥粉煤灰浆液
郑-少高速公路	50-180	3-4.4	全充填压力注浆法	水泥粉煤灰浆液

高速公路下伏采空区治理目前存在的问题主要是治理措施单一，治理费用昂贵。整理公路下伏采空区治理方面的文献，其治理措施如表 2.2。通过表中可以看到，采空区处治措施和方法还存在许多问题值得研究，如采用桥跨结构穿越小型采空区、采用覆岩离层注浆技术控制地层沉降、加强建筑物基础刚度和上部结构强度等。同时也发现

某些采空区不予治理,通过后期维护措施同样可以保证正常运营,某些路段则可以采取绕避方案

表 2.2 公路下伏采空区治理措施

采空类型		治理方法
小型采空区		①小型采空区隐患较大,易发生突然变形,对公路危害严重。此线路一般应以绕避为宜。若必须通过,也必须尽可能查明情况,彻底处理,不留后患。②)地下水位的变化对小型采空区影响较大,因此对小型采空区附近的工农业抽水以及水库水位变化,要作为重要因素予以慎重考点。③用钻探的方法查清线路基底的坑洞,进行回填处理,回填材料一般用毛石混凝土或粉煤灰。④采用桥梁跨越小型采空区,使桥梁基础置于坑洞底板以下。⑤探灌结合的方法进行处理,但坑洞较大时,灌注数量难以估计,钻探量大,质量不好控制。⑥以隧道通过小型采空区时,应慎重查明其下的小型采空情况。对有突然陷落可能的采空应进行回填处理,并留净空,增加沉降缝,加强衬砌的结构强度。若情况难以查明时,线路应予以绕避。⑦加强建筑物基础及上部结构刚度。
大型采空区	老采空区	①采用覆岩离层注浆技术控制地层沉降技术②)采用阻隔地表非线性变形向地面构筑物传递技术,如活动基础设计等,对公路工程指改变路基、路面结构,应用新型路面材料提高路基路面抗变形能力③采动覆岩扩容(胶结)控制岩体沉降技术,主要指注浆、研充填等④构筑墩柱支撑覆岩,包括灌注柱,土砌或浆砌地下柱墙等
	现采空区	在已有铁路、公路建筑物的地下开采,或线路要通过正开采的矿区时,常采取以下保护措施,防止地表和建筑物变形。 ①留设保护矿柱 ②改变开采工艺,减小地表下沉量。如: (a)采取充填法处理顶板,及时全部充填或分次充填,以减少地表下沉量。 (b)减少开采厚度或采用条带法(房柱式)开采,使地表变形值不超过建筑物的容许极限值。

	(c)增大采空区宽度,使地表移动充分和建筑物很快处于盆地中部的均匀下沉区。 (d)控制开采的推进速度均匀,合理进行协调开采。 ③加强建筑物基础刚度和上部结构强度。 ④加强维修养护,在地表变形期,特别是变形活跃期,应加强巡道,对建筑物加强观测,发现变形及时维修。 ⑤松土坑洞已坍塌成陷坑,空洞小时,仅做地表夯实,可不作其它处理。 ⑥坑洞埋深较深,可用试坑和分段拉槽的方法,用普通土或卵石土灌注回填夯实。 ⑦对建筑有影响且埋深较浅的采空,可用开挖回填方法处理。 ⑧埋深较深,面积较大的采空区可用钻孔压力注浆处理。 ⑨根据洞穴变形的预测值,选择相应的和允许变形的建筑结构形式。
将来采空	为了避免公路下伏矿山开采时处理困难,影响正常公路运行,在新线公路设计阶段,特别是干线、高等级公路,以尽量避开采窄区为宜,尤其是矿层急倾斜的矿区。

2.2 项目现有工作条件

2.2.1 项目前期工作基础

项目前期已开展大量工作,进行了改性水泥-粉煤灰-风积沙-煤矸石复合固废注浆材料的配比研发工作,针对大锦高速沿线丰富的风积沙、煤矸石、粉煤灰等固废资源,通过室内研究、现场试验等手段,利用多源固废材料的化学成分和矿相组成的协同效应开展多源固废胶凝材料的研发。完成了固废浆液原材料的性能测试,包括水泥抗压、抗折强度,粉煤灰细度、烧失量、化学成分测定,煤矸石筛分级配、压碎值、密度、含水率等试验。



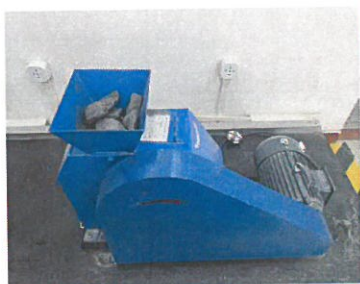
抗压强度



粉煤灰细度试验



粉煤灰烧失量



矸石破碎



级配筛分



凝结时间测定



表观密度



流动度测定



级配筛分



凝结时间测定

图 2.1 固废材料性能测试

通过实验，帷幕孔固水比=4，粗骨料（煤矸石）占固相 80%，降低水泥含量同时增加粉煤灰含量，测定浆液密度、流动度、塌落度、泌水率、以及抗压强度等指标，确定较优配比 水泥：粉煤灰：煤矸石：水=1：2.6：12：4（质量比）。注浆孔固水比=1.3~1.5，固相水泥占比 20%，随风积沙含量增加，外加剂（膨润土、水玻璃）含量随之增加，同时 7d 试块强度降低。综合实验结果，第 5 组、第 14 组，第 18 组浆液性能较好，各项指标满足采空区注浆要求。

编号	水泥 (kg)	粉煤灰 (kg)	煤矸石集料(kg)			水 (kg)	扩展度 (mm)	塌落度 (mm)	表观密度 (kg/m ³)	泌水率 (%)	结石率 (%)	3d强度 (MPa)	7d强度 (MPa)
			<4.75 mm	4.75- 9.5mm	9.5- 16mm								
①	3.6	5.04	14.56	8.74	5.82	9.44	440	225	1.905	/	/	0.677	1.137
②	3.2	5.44	14.56	8.74	5.82	9.44	460	225	1.936	8.98	94.13	0.532	1.041
③	2.8	5.84	14.56	8.74	5.82	9.44	430	225	1.928	7.73	93.86	0.385	0.790
④	2.4	6.24	14.56	8.74	5.82	9.44	500	223	1.870	6.96	92.07	0.343	0.740

序号	编号	试验日期	固水比	固相比 (水泥:粉煤灰:砂)	粉煤灰:砂	水玻璃 掺量	膨润土 掺量	流动度 (s)	比重	粘度	结石率 (%)	凝结时间(初凝) (h:min)	凝结时间(终凝) (h:min)	7天抗压 强度 (MPa)	28天抗压 强度 (MPa)	备注
1	1.0	2024.4.12	1.3	11:89	90:10	/	/	12	/	/	/	/	/	/	/	
2	1	2024.4.12	1.5	11:89	90:10	/	/	14	1.475	1分20秒	86.6	18h42m	24h26m	0.46		
3	2.1	2024.4.17	1.3	20:80	90:10	/	/	10.53	/	/	/	/	/	/	/	
4	2.2	2024.4.17	1.4	20:80	90:10	/	/	11.42	/	/	/	/	/	/	/	
5	2.3	2024.4.17	1.5	20:80	90:10	/	/	12.3	1.480	1分08秒	88	18h37m	25h16m	0.93		
6	3.3	2024.4.17	1.5	25:75	90:10	/	/	12.13	1.450	1分05秒	91	17h23m	23h35m	1.29		
12	7.1	2024.4.19	1.3	20:80	80:20	6%	/	10.79	1.425	35s	88	21h51m	25h40m	0.46		
13	7.2	2024.4.19	1.3	20:80	80:20	/	20%	/	/	46.51s	/	/	/	/	/	试样:玻璃砖叠样
14	7.2	2024.4.22	1.3	20:80	80:20	/	20%	10.79	1.479	36.12s	89	18h32m	27h31m	0.53		加膨润土比加水玻璃状态稠
17	9.1	2024.4.22	1.3	20:80	70:30	9%	/	10.8	1.468	30.3s	94	20h19m	26h17m	0.22		
18	9.2	2024.4.22	1.3	20:80	70:30	/	30%	10.0	1.526	35.05s	92.5	23h27m	25h54m	0.43		
21	11.2	2024.4.22	1.3	20:80	50:50	/	30%	/	1.505	/	87	/	/	/	/	试样:玻璃砖叠样 比重偏小, 搅拌方式为水平, 上下可能不均匀

图 2.2 固废材料配比试验

开展了部分室内模型实验, 针对大锦高速浅伏厚基岩房柱式采空区的项目特点, 自制了几何相似比为 1:50 的物理模型实验系统, 已完成有限单元板等材料制作, 并已开展了小窑采空区回采岩层移动变形特征及地表沉陷规律等相关机理研究, 为浅伏厚基岩下房柱式采空区灾变机理研究奠定了一定基础。处治范围优化和注浆处置效果评价相关试验有待后续进一步开展。



图 2.3 室内模型试验

2.2.2 项目协作条件

项目团队成员均为公路行业道路与桥梁或地质工程相关专业技术人员,且高级工程师及以上占比超过 60%,长期从事高速公路建设管理、新材料新设备的研发、工程试验及检测、养护工程检测、设计、施工一体化等相关工作,积累了丰富的公路工程建设相关经验。且与陕西交控建投经营管理有限公司、山西省交通科学研究院、陕西省交通规划设计研究院有限公司和相关高校建立了长期良好的合作关系。能为本课题研究提供项目协作条件。

陕西交控建投经营管理有限公司是陕西交通控股集团有限公司旗下核心子公司,依托陕西交控集团全国领先的交通全产业链资源与省级科研创新体系,深耕陕西省交通基础设施建设投资、运营管理与技术创新领域,是陕西省交通建设领域兼具工程实践底蕴与科研攻关能力的专业化企业,具备为本项目提供全流程科研支撑与硬件保障的核心实力。

公司科研硬件设施完备,试验验证条件行业领先,自主搭建沥青混合料性能检测移动试验室等专业化现场检测与试验平台,配备路面材料性能检测、桥梁结构智能监测、工程力学数值仿真等全套智能化试验设备,可实现项目研究从室内试验、数值模拟到现场试验验证的全场景硬件支撑。同时公司可全面共享陕西交控集团建成的固废高效再生利用技术院士工作站、陕西省智慧交通产业中试基地等 20 个省部级科研平台资源,联动绿色建材智能制造示范基地、高性能交通材

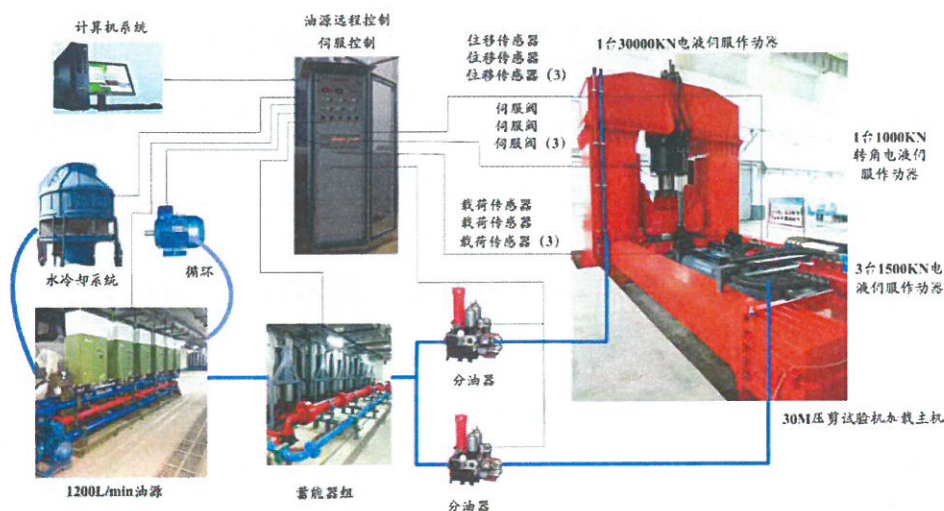
料研发生产线等产业化平台，具备完善的科研中试、成果验证与工程化转化硬件条件，能够为本项目关键技术攻关提供充足的试验场地、先进的检测设备与全链条工程化验证载体。

科研创新实力方面，公司聚焦交通工程结构优化、高性能路面材料、桥梁智能运维、交通工程数字化仿真等核心方向打造了专业化科研团队，形成了完善的技术研发、课题攻关与成果转化体系，目前已取得 28 项自主知识产权专利，其中多项发明专利聚焦钢混组合桥 UHPC 铺装结构有限元模拟、装配式混凝土桥梁受力状态智能评估等行业前沿技术领域，相关创新成果获评陕西省“三新三小”创新竞赛奖项，具备扎实的技术研发与课题攻坚能力。公司深度参与陕西省高速公路建设、养护、运营全链条技术创新工作，先后联合中交公路长大桥建设国家工程研究中心、省内重点高校等单位开展多项交通领域关键技术攻关，对陕西省高速公路建设运营的行业现状、技术痛点与发展需求有着深刻且全面的理解，与本项目研究方向高度契合。

作为本项目合作单位，公司可充分发挥自身科研硬件优势与工程实践优势，为本项目提供理论研究落地、试验方案设计、室内外试验验证、成果工程化应用等全链条协作保障，与申报单位形成高速公路运营管理实践与前沿科研技术的深度互补，确保项目研究贴合陕西交通行业发展实际，推动科研成果高效落地与规模化推广，为项目高质量完成提供坚实、可靠的协作支撑。

山西省交通科学研究院一直从事采空区治理相关的工程技术服务、科技研发。近年来，公路采空区处治技术团队承担采空区地质灾害方面的各类科研项目 23 项；发表论文 30 余篇；获得各类省部级奖

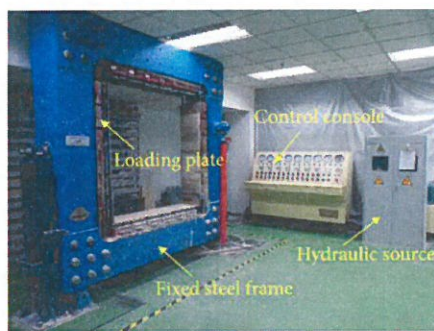
项 8 项；授权国家发明专利 9 项；主编行业标准 1 部、山西省地方标准 2 部，获省级工法 1 项。在理论→材料→装备→工艺→规范→示范工程，形成了全产业链形成系统性创新性研究成果。黄土地地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室依托于山西交通科学研究院集团有限公司和山西省交通科技研发有限公司，拥有科研实验面积 12000 多平米。在实验室科学规划、系统建设和资源利用的基础上，建立了 25 个科技创新平台，15 个试验系统，有力地保证了实验室研究条件处于国内乃至国际同行中的领先地位，为本项目的室内模型试验研究工作提供了良好的试验条件；如用于材料试验的微机控制电子万能试验机 WDW-1000、疲劳试验机 MTS 等，用于结构静载和地震试验的 20000kN 重型结构多通道空间加载系统和三维地质力学模型实验系统等，为本项目的材料和结构试验研究工作提供了良好的试验基础条件；另外，正在建设基于“天河二号”的国家超算中心可满足本项目数值计算要求。另外，本项目申请单位与深部岩土力学地下工程国家重点实验室具有良好的合作关系，其中深部工程破坏过程模型实验系统、2000kN 静力拉伸实验系统、数字散斑成像系统、岩石动力热红外分析系统、动态应力应变测试系统为本项目的研究工作提供了良好的软/硬件条件。



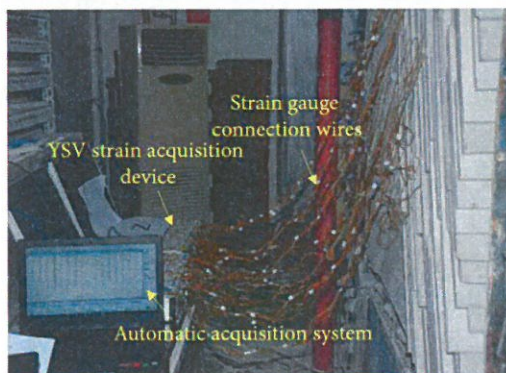
(a) 30000kN 电液伺服多通道加载系统



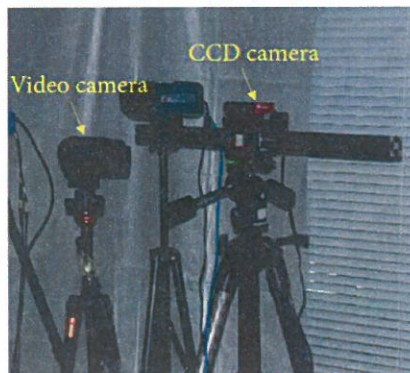
(b) 2000kN 静力拉伸实验系统



(c) 深部工程破坏过程模型实验系统



(d) 动态应力应变测试系统



(e) 数字散斑及热红外呈像系统

图 2.4 试验仪器

陕西省交通规划设计研究院有限公司成立于 1958 年,是隶属于陕西交通控股集团的大型综合性国有勘察设计企业,为陕西省高新技术企业、国家“科改示范企业”,拥有工程设计公路行业甲级、工



程勘察综合甲级等 29 项顶级资质，2014 年被交通运输部指定为国家重点公路工程设计审查咨询单位，是陕西省交通基础设施建设与技术研发领域的核心支撑单位陕西省交通规划设计院有限公司。

公司人才储备雄厚，科研梯队完善，现有职工 612 人，其中硕士研究生以上学历 288 人，正高级职称 44 人，高级职称 288 人，各类注册人员 173 人，获批设立国家级博士后科研工作站，与长安大学等高校共建校企联合人才培养基地，打造了一支深耕交通行业、技术功底扎实、科研经验丰富的专业团队，具备承担省部级重大科研项目的核心人才保障。

公司深耕陕西交通领域六十余年，承担了全省 85% 以上高速公路项目的工程可行性研究和 70% 以上高速公路项目的勘察设计工作，对陕西省高速公路建设、运营、管理的行业现状、技术痛点与发展需求有着深刻且全面的理解，与本项目高速公路运营管理的研究方向高度契合。科研创新方面，公司拥有省级企业技术中心、BIM 技术与全装配结构研究中心等多个专业化科研平台，先后主持和承担多项陕西省交通运输厅科研项目，多项课题均顺利通过验收，累计斩获交通部科技进步奖、陕西省科学技术奖等省部级以上科技奖项 26 项，取得发明专利和实用新型专利 253 项、软件著作权 40 项，主导和参与编制十余部行业与地方标准，深度参与交通强国试点任务并形成多项可复制推广的创新成果，具备完善的科研攻关、试验验证、成果转化全流程实施能力。

作为本项目的合作单位，公司可充分发挥自身在交通科研、勘察

设计、技术落地等方面的核心优势,为本项目提供理论研究支撑、技术方案论证、现场试验验证、成果工程化应用等全链条协作保障,与申报单位形成高速公路运营管理实践与前沿科研技术的深度互补,确保项目研究贴合工程实际、科研成果高效落地,为项目高质量完成与推广应用提供坚实的协作支撑。

2.3 参考文献

- [1] 郭广礼,查剑锋. 矿山开采沉陷学[M]. 矿山开采沉陷学, 2020.
- [2] 赵卫强,孟晴. 国内外矿山开采沉陷研究的历史及发展趋势[J]. 北京工业职业技术学院学报, 2010, 9(1): 4.
- [3] 缪协兴,茅献彪. 岩石(煤)的碎胀与压实特性研究[J]. 实验力学, 1997, 12(3): 7.
- [4] 张冬至,邓喀中. 采动岩体碎胀系数变化规律研究[J]. 江苏煤炭, 1998(1): 3.
- [5] 郭广礼,缪协兴,张振南. 老采空区破裂岩体变形性质研究[J]. 科学技术与工程, 2002, 2(005): 44-47.
- [6] 钱鸣高,许家林. 覆岩采动裂隙分布的“O”形圈特征研究[J]. 煤炭学报, 1998, 023(005): 466-469.
- [7] 张永波,崔海英. 老采空区覆岩失稳“活化”机理的实验研究[C]. 中国地质学会工程地质专业委员会学术年会暨“生态环境脆弱区工程地质”学术论坛, 2007.
- [8] Mark C. Analysis of longwall pillar stability[D]. The Pennsylvania State University., 1987.
- [9] Singh A K, Singh R, Maiti J, et al. Assessment of mining induced stress development over coal pillars during depillaring[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(5): 805-818.
- [10] 任连伟,宁浩,邹友峰, et al. 采空区场地高速铁路路基变形控制研究现状与展望[J]. 煤炭学报, 2021, 46(8): 14.
- [11] 钱鸣高. 采场围岩控制理论与实践[J]. 矿山压力与顶板管理, 1999, 29(003): 12-15.

- [12] 宋振骐, 蒋金泉. 煤矿岩层控制的研究重点与方向[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(2): 7.
- [13] 宋正阳. 基于传递岩梁理论的周期来压步距预测研究[J]. 科技创新与应用, 2015(17): 1.
- [14] 吴立新, 肖玉仁. 托板控制下开采沉陷的滞缓与集中现象研究[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(4): 10.
- [15] 吴立新, 肖玉仁. 托板控制下开采沉陷的阶段性和板裂性[J]. 矿山测量, 1994(4): 4.
- [16] Wu K, Cheng G-L, Zhou D-W. Experimental research on dynamic movement in strata overlying coal mines using similar material modeling[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2014, 8(9): 6521-6534.
- [17] Zhang C, Tu S H, Zhao Y X. Compaction characteristics of the caving zone in a longwall goaf: a review[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(1).
- [18] 朱广轶, 徐征慧, 解陈, et al. 老采空区地表残余移动变形影响函数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(10): 9.
- [19] 文超. 金属矿山地下开采引起岩体变形规律[J]. 岩石力学与工程学报, 34(9): 1859-1868.
- [20] 刘晓菲, 邓喀中, 范洪冬, et al. D-InSAR 监测老采空区残余变形的试验[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 6.
- [21] 郭庆彪, 王磊, 李英明, et al. 壁式废弃采空区地表建设再利用风险识别, 评估与控制[J]. 煤炭技术, 2019, 38(10): 3.
- [22] 蔡为益, 张东升, 陶祥令. 煤矿采空区拟建铁路选线区地基适宜性分析研究[J]. 煤炭工程, 2019(2): 6.
- [23] Zhang C, Zhao Y, He X, et al. Space-sky-surface integrated monitoring system for overburden migration regularity in shallow-buried high-intensity mining[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 80(2): 1403-1417.
- [24] Zheng M N, Deng K Z, Fan H D, et al. Monitoring and Analysis of Surface Deformation in Mining Area Based on InSAR and GRACE[J]. Remote Sensing, 2018, 10(9).
- [25] Li M, Zhang J X, Wu Z Y, et al. Calculation and monitoring analysis of stress

- distribution in a coal mine gob filled with waste rock backfill materials[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(14).
- [26] He F L, Li X B, He W R, et al. The Key Stratum Structure Morphology of Longwall Mechanized Top Coal Caving Mining in Extra-Thick Coal Seams: A Typical Case Study[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020: 1-13.
- [27] Yu B, Zhang Z Y, Kuang T J, et al. Stress Changes and Deformation Monitoring of Longwall Coal Pillars Located in Weak Ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(8): 3293-3305.
- [28] Zhang G C, Tao G Z, Chen M, et al. Numerical Study on the Movement Laws of Overlying Strata in Shallow-Buried Stope Based on the Goaf Compaction Effect[J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1-8.
- [29] Qu Q D, Guo H, Khanal M. Monitoring and analysis of ground movement from multi-seam mining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 148.
- [30] Guo G C, Yang Y K. The Study of Key Stratum Location and Characteristics on the Mining of Extremely Thick Coal Seam under Goaf[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021: 1-9.
- [31] Wang C, Jiang N, Shen B, et al. Distribution and evolution of residual voids in longwall old goaf[J]. Geomechanics and Engineering, 2019, 19(2): 105-114.
- [32] 刘玉成, 戴华阳. 近水平煤层开采沉陷预计的双曲线剖面函数法[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48(3): 6.
- [33] 张惠生, 顾伟. 典型曲线法在山东龙口软岩煤矿区开采沉陷预测中的应用[J]. 地质找矿论丛, 2014, 29(001): 84-90.
- [34] 李金洋, 臧明东, 徐能雄, et al. 基于概率积分法的采空区残余变形对桑掌隧道的影响研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(2): 11.
- [35] 郑美楠, 刘沂轩, 邓喀中, et al. 基于 DInSAR 与概率积分法的铁路变形监测与预测[J]. 测绘通报, 2017(1): 6.
- [36] 于广明, 杨伦, 王永岩, et al. 非线性科学在矿山开采沉陷中的应用(1)[J]. 阜新矿业学院学报, 1997, 16(4): 4.
- [37] Xie Y S, Zhao Y S. Numerical simulation of the top coal caving process using the

- discrete element method[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(6): 983-991.
- [38] Goh T L, Wong J M, Rafek A G, et al. Stability Assessment of Limestone Cave: Batu Caves, Selangor, Malaysia[J]. Sains Malaysiana, 2018, 47(1): 59-66.
- [39] Doğan S, Güllü H. Multiple methods for voxel modeling and finite element analysis for man-made caves in soft rock of Gaziantep[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 81(1).
- [40] Liu Q, Wei L, Chen J, et al. Stability Analysis of Water-Resistant Strata in Karst Tunnel Based on Releasable Elastic Strain Energy[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017, 2017: 1-9.
- [41] Pang L, Liu W, Zheng Q, et al. Evaluation and analysis of metal mine filling based on numerical simulation and actual measurement[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(16).
- [42] 郭庆彪. 废弃采空区地基稳定性极简评价指标体系构建[J]. 金属矿山, 2019(9): 6.
- [43] 陈尚波, 杨双有. 某复杂采空区顶板稳定性数值分析[J]. 采矿技术, 2019, 19(3): 4.
- [44] 张慧敏. 长壁采空区上地基稳定性评价[J]. 自动化应用, 2019(8).
- [45] 王永增, 王心泉, 王润, et al. 基于 CDEM 的采空区稳定性及临界顶板厚度分析[J]. 金属矿山, 2021(5): 6.
- [46] 张杰, 王斌, 白文勇, et al. 浅埋近距间隔式采空区顶板“双拱桥”结构稳定性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(3): 8.
- [47] 王华玲. 下伏采空区公路隧道结构安全稳定性评价及处治措施研究[J]. 西南公路, 2019(4): 7.
- [48] Yuan F, Tang J X, Wang Y L, et al. Numerical Simulation of Mechanical Characteristics in Longwall Goaf Materials[J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2022, 39(2): 557-571.
- [49] Yadav A, Behera B, Sahoo S K, et al. An Approach for Numerical Modeling of Gob Compaction Process in Longwall Mining[J]. Mining Metallurgy & Exploration, 2020, 37(2): 631-649.

- [50] Pang L F, Liu W T, Zheng Q S, et al. Evaluation and analysis of metal mine filling based on numerical simulation and actual measurement[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2021, 80(16).
- [51] Zhao X D, Zhu Q K. Analysis of the surface subsidence induced by sublevel caving based on GPS monitoring and numerical simulation[J]. *Natural Hazards*, 2020, 103(3): 3063-3083.
- [52] Guo Q B, Li Y M, Meng X R, et al. Instability risk assessment of expressway construction site above an abandoned goaf: a case study in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78(20).
- [53] Cai G T, Sui W H, Wu S L, et al. On-Site Monitoring for the Stability Evaluation of a Highway Tunnel above Goaves of Multi-Layer Coal Seams[J]. *Applied Sciences-Basel*, 2021, 11(16).
- [54] Du M Q, Wang X C, Zhu J X. Analysis on Stability of Edge Roadbed in Large Mined-Out Regions Where the High-Speed Railway Pass[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(3): 1849-1860.
- [55] Wang F, Zou P, Meng Z, et al. Study on Stability of Goaf Pillars in Daqiao Phosphate Mine: Theoretical Calculation and Field Investigation[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2018, 37(3): 1483-1492.
- [56] Jme, Rezaei M. Long-term stability analysis of goaf area in longwall mining using minimum potential energy theory[J]. *Shahrood University of Technology*, 2017(1).
- [57] Fang F, Shu C, Wang H T. Physical simulation of upper protective coal layer mining with different coal seam inclinations[J]. *Energy Science & Engineering*, 2020, 8(9): 3103-3116.
- [58] Meng Z P, Shi X C, Li G Q. Deformation, failure and permeability of coal-bearing strata during longwall mining[J]. *Engineering Geology*, 2016, 208: 69-80.
- [59] Wang Y, Wang X, Zhang J, et al. Roof Subsidence and Movement Law of Composite Strata Mining: Insights from Physical and Numerical Modeling[J]. *Minerals*, 2021, 12(1).

- [60] Li H, Zhao B, Guo G, et al. The influence of an abandoned goaf on surface subsidence in an adjacent working coal face: a prediction method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 77(1): 305-315.
- [61] Cao J, Huang Q, Guo L. Subsidence prediction of overburden strata and ground surface in shallow coal seam mining[J]. Sci Rep, 2021, 11(1): 18972.
- [62] 钟屹岩, 董梦龙, 荀荫, et al. 基于三维离散元的地下采空区灌浆支护分析--以连云港新浦磷矿为例[J]. 甘肃科学学报, 2022, 34(1): 8.
- [63] 陈建平. 公路采空区地基注浆施工问题探讨[J]. 交通建设与管理, 2021(5): 2.
- [64] Chernysheva M, Araithi M A, Rance G A, et al. Revealing the nature of morphological changes in carbon nanotube-polymer saturable absorber under high-power laser irradiation[J]. Sci Rep, 2018, 8(1): 7491.
- [65] 张开诚, 张超, 王德全, et al. 高掺量粉煤灰注浆材料在采空区治理中的应用[J]. 有色金属: 矿山部分, 2021, 73(2): 8.
- [66] 彭永良, 胡卸文, 宋大各, et al. 大型复杂采空区注浆效果检测方法研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(4): 664-671.
- [67] 曹帅, 刘涛, 史伟东. 采空区断层裂隙带注浆防治技术应用[J]. 陕西煤炭, 2021, 40(6): 7.
- [68] 张刚艳. 选煤厂下伏多层倾斜煤层采空区稳定性评价与治理技术研究[J]. 金属矿山, 2015, 44(04): 66-70.
- [69] 路乔, 杨智超, 杨志全, et al. 考虑扩散路径的宾汉姆流体渗透注浆机制[J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 10.
- [70] 刘若坤, 王伟, 黎海滨, et al. 基于传递矩阵算法的裂隙注浆扩散机制研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(1): 7.
- [71] 王兵强. 深部条带采空区注浆效果综合评价技术与应用[J]. 煤炭工程, 2021, 53(8): 7.
- [72] 张庆松, 张连震, 刘人太, et al. 基于“浆-土”界面应力耦合效应的劈裂注浆理论研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 8.
- [73] Balmer F A, Ottiger P, Leutwyler S. Experimental and Calculated Spectra of pi-Stacked Mild Charge-Transfer Complexes: Jet-Cooled

- Perylene.(Tetrachloroethene) n , $n = 1,2$ [J]. J Phys Chem A, 2015, 119(42): 10462-74.
- [74] 王晓晨, 刘人太, 杨为民, et al. 考虑水泥浆液析水作用的水平裂隙注浆扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019(5): 13.
- [75] 雷进生. 碎石土地基注浆加固力学行为研究[J]. 中国地质大学, 2013.
- [76] Du Z W, Yang H Z. Gangue-Cemented Fill in Goaf to Control Surface Subsidence During Longwall Mining: A Case Study from the Huaheng Coal Mine, China[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2018, 37(4): 2453-2461.
- [77] Li X L, Guo X L, Sun G. Grouting Reinforcement Mechanism and Multimodel Simulation Analysis of Longwall Goaf[J]. Geofluids, 2021, 2021: 1-13.
- [78] Ao X F, Wang X L, Zhu X B, et al. Grouting Simulation and Stability Analysis of Coal Mine Goaf Considering Hydromechanical Coupling[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(3).
- [79] 程新涛, 李利彬, 赵翩翩. 注浆法治理公路下伏采空区的注浆范围分析[J]. 路基工程, 2010(3): 3.
- [80] 朱世彬. 煤矿采空区充填墩台承载特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(5): 7.
- [81] 王新锋, 李建文. 桥基下伏空洞型采空区的治理技术研究[J]. 公路, 2013(11): 4.
- [82] Amelung F, Galloway D L, Bell J W, et al. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation[J]. Geology, 1999, 27(6):483.
- [83] Berardino P, Fornaro G, Fusco A, et al. A new approach for analyzing the temporal evolution of Earth surface deformations based on the combination of DIFSAR interferograms[C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. IEEE Xplore, 2001.
- [84] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1):0-20.
- [85] Ferretti A. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatters in

- differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2000, 38(5):2202-2212.
- [86]Gabriel A K, R M Goldstein, H A Zebker. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry. J. Geophys. Res., 1989, 94(B7):9183-9191.
- [87]Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry [J]. Nature, 1993, 364(6433): 138-142.
- [88]Peng L, Qingquan L, Zhenhong L, et al. Anatomy of Subsidence in Tianjin from Time Series InSAR[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3):266-.
- [89]Sansosti E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 2004, 42(7):1377-1386.
- [90]高二涛, 范冬林, 付波霖, et al. 基于 PS-InSAR 和 SBAS 技术监测南京市地面沉降[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(02):52-57.
- [91]刘冰, 张永红, 吴宏安, 等. 时间序列 InSAR 技术辅助下的北京市高速公路网沉降监测应用[J]. 测绘通报, 2018.
- [92]芮勇勤, 陈佳艺, 丁晓利. 基于 InSAR 与 GPS 技术的公路采空区变形监测[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(12):1773-1776.
- [93]师红云, 刘广, 杨松林. 基于时序 InSAR 技术的京津高铁区域沉降稳定性评估[J]. 北京交通大学学报, 2014, 38(6):78-81.
- [94]王琪. 利用永久散射体雷达干涉技术进行太原市地面沉降监测[J]. 测绘通报, 2014(5):71-75.
- [95]杨侣珍. 基于 GPS、CR-InSAR 技术的高速公路采空区路基变形监控研究[D]. 长沙理工大学, 2009.
- [96]于博文, 田淑芳, 赵永超, 等. 高分一号卫星在京津矿山遥感监测中的应用[J]. 现代地质, 2017(04):195-202.
- [97]刘智, 黄洁, 孙小飞, 等. 基于 GF-1 影像的西藏亚东地区构造解译研究[J]. 中国地质调查(3).

- [98]朱娇. 基于高分一号影像的宝兴县滑坡信息提取研究[D]. 成都理工大学, 2015.
- [99]黄光球, 刘权宸, 陆秋琴. 基于状态 Petri 网的矿区生态环境脆弱度动态评价方法[J]. 安全与环境学报, 2017(4).
- [100]张景秀. 坝基防渗与灌浆技术[M]. 中国水利水电出版社, 2002.
- [101]熊云川. 水泥动态[J]. 建材发展导向, 2015, (4): 77.
- [102]刘红卫. 地基加固的复合注浆技术及应用研究[D]. 重庆大学, 2003.
- [103]李蓉. C—S 浆液耐久性外掺剂的研究[C]//全国首届岩石锚固与注浆学术会议论文集. 1995.

三、研究内容及实施方案

3.1 拟解决的关键问题

关键技术 1: 引入等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 与 InSAR 技术融合的采空区综合勘探技术

InSAR 技术的优势在于能够调用历史影像数据, 进行高精度的雷达干涉成像, 对于采空区的范围、周期沉降值、沉陷危险区域划分具有显著优势。而 OCTEM 技术, 采用收发一体天线, 使接收天线处于一次场零磁通平面上, 在激发电流中断间隙, 接收面的一次场磁通不变, 不会产生一次场感应电动势, 有效消除一次场干扰, 从而实现对纯二次场信号进行观测, 提高勘察精度。二者融合, 对提取采空区的位置、形状、空间展布与地表变形特征具有显著优势。鉴于项目路线 K0+923 ~ K4+430 段穿越锦源煤矿且下穿包西铁路, 存在强电磁干扰环境, 传统瞬变电磁法 (TEM) 探测精度易受影响。故需要对其进行相应措施: ①抗干扰技术升级: 在瞬变电磁探测方案中增加抗干扰模块, 采用多匝小回线装置及叠加多次观测技术, 压制铁路牵引电流等人文噪声干扰。②数据处理优化: 引入基于噪声估计的自适应滤波算法, 对原始观测数据进行去噪处理, 提高低阻异常体 (采空区)



识别的信噪比, 确保铁路邻近区域采空区探测结果的可靠性。同时, 本研究中的正演计算中采用新的网格剖分方法, 达到三维有限元计算的快速与精确。反演计算中采用卷积-双向长短时记忆网络 (CNN-BiLSTM) 对物探数据进行深度学习, 建立神经网络模型, 达到精确的三维反演。

关键技术 2: 提出改性粉煤灰/风积沙/煤矸石全固废类采空区注浆充填材料的制备方法及灌注一体施工工艺、质量控制标准。

改性粉煤灰/风积沙全固废类, 不仅具有低廉的价格, 同时具有良好的收缩率低、强度高、流动性高等力学性能, 建成灌注一体化设备和质量控制标准, 不仅能够大幅度降低采空处治技术成本, 同时能够提高路基动力力学承载特效。

关键技术 3: 提出浅伏厚基岩采空区治理合理宽度并给定其及稳定性评价计算方法

根据浅伏厚基岩断裂承载力学特性、采空沉陷机理及点状 (模袋法)、条带状 (帷幕法) 采空区处治技术, 提出小于开采移动角的影响带处治宽度范围, 保障路基安全稳定条件下精细化治理宽度和范围, 节约处治成本, 提高工程的耐久性和稳定性。

关键技术 4: 提出重载高速公路下房采区“点-线”结合精准探测及膜袋快速封堵技术研究 (定向探测)

采用坑道定向钻机实现房柱式采空区精准探测, 结合常规钻机和三维激光扫描科学圈定注浆区域, 基于注浆膜袋实现房采区控制充填, 优化重载高速公路治理宽度, 监测治理房采区上伏公路变形, 评价治理房采区稳定性, 形成重载高速公路下房采区精准探测、靶向注浆及

稳定性监测一体化技术。

3.2 主要研究内容及实施方案

研究内容一：采空区精细化物理探测及残余变形特征研究

(1) 采空沉陷区“空-天-地”一体化融合探测技术研究

结合星载 InSAR 技术、机载 LiDAR 技术、地表 GNSS 监测以及高精度瞬变电磁法对采空沉陷区进行识别与探测。InSAR 技术具有大面积、全天候、高精度等观测优点，机载 LiDAR 具有分辨率高、穿透性强的技术特点。首先利用大锦高速采空区过去三年哨兵 1A 卫星宽幅模式数据(C 波段)，基于小基线集干涉测量方法(SBAS-InSAR)初步识别得到采空沉陷区范围及沉陷趋势，针对形变梯度较大的区域，然后利用陆地探测 1 号卫星数据(L 波段)进行数据处理和沉陷识别，提升识别结果覆盖率和可用性，特别是在形变监测环节，将采用 D-InSAR 与 PS-InSAR 组合方案，以解决剧烈形变区相位解缠失效难题。其次，利用机载 LiDAR 对采空沉陷区进行精细化三维建模，全面反映不同时期采空区的空间沉陷分布。同时开展地表 GNSS 变形观测，与 InSAR 数据互相验证校准，此外，针对地下工程掌子面电磁场边界条件和施工场地特殊环境，引入基于等值反磁通瞬变电磁原理的地下工程地质病害电磁探测 ADTEM-18 系统，对采空区的范围、地层状态和残余变形进行进一步研究和修正。综合利用上述多种方法得到采空区的沉陷状态及形变趋势信息，为后续精细化监测及分析夯实基础。

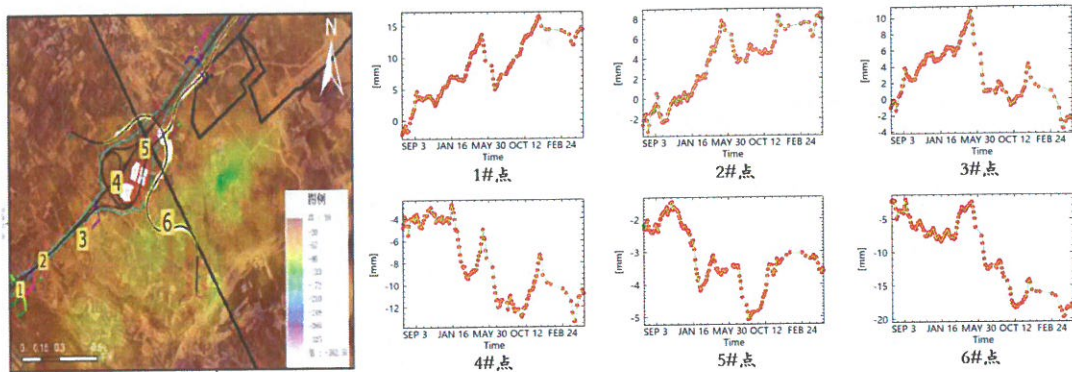


图 3.1 InSAR 历史沉降观测

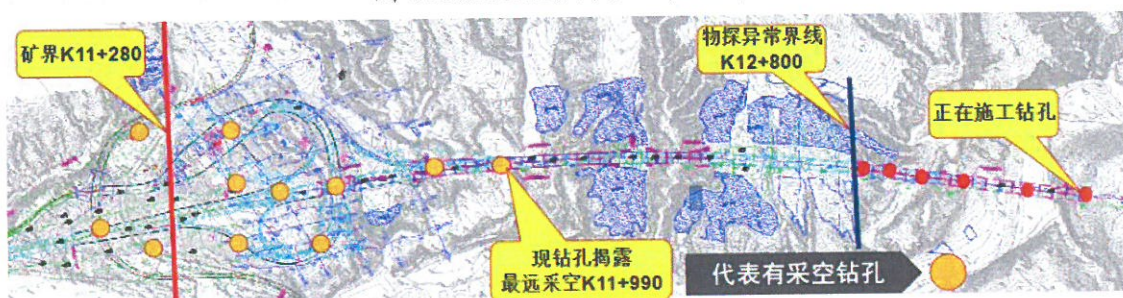


图 3.2 瞬变电磁探测

(2) 开采沉陷区动态预计模型及动态预测方法

利用 Knothe 时间函数并结合地表沉降力学模型, 同时将地表实测数据进行对比分析, 实现开采过程中地表沉陷动态预测模型和分析方法, 计算结果与 InSAR 技术数据进行分析对比, 并进行相互校验和修正。地下开采引起的地表变形具有时间依赖性和高度非线性。将 InSAR 技术与用于预测采矿沉降的概率积分方法相结合, 并结合改进 Knothe 时间函数建立了矿区沉降动态预计模型, 得到矿区的地表沉降动态变化过程, 实现对隧道附近采空区沉降变形区域进行识别与危险区域划分, 明确沉陷区的边界和影响范围。

研究内容二: 浅伏厚基岩采空区治理宽度参数优化及稳定性评价

(1) 浅伏厚基岩采空沉陷机理及移动影响边界确定

通过理论分析、室内物理模拟实验、数值模拟等手段对浅伏厚基

岩房柱式采空区地表沉陷变形的发育机制和沉陷机理进行研究。通过室内模型试验模拟房柱式煤层开挖、煤柱软化失稳、注浆充填等工况,研究采空区上覆岩层及地表的沉陷和变形规律,得到注浆前后地表变形的影响范围,通过数值模型试验对试验结果进行验证。

采空区构筑物边界处治宽度优化分析。本项目采空区处治设计主要参考规范为《采空区公路设计与施工技术规范》,根据规范,公路采空区注浆处治的范围应该根据采空区的分布、埋藏深度及上覆岩性等因素确定,采空区处治的宽度 B 由路基或桥隧等构造物宽度、围护带宽度、采空区覆岩移动的影响宽度三部分组成,计算公式如下

$$B = D + 2d + D'$$

其中: D —路基或桥隧宽度,路堤部分以公路两侧路堤坡脚(有排水沟时以排水沟外边缘)为界;路堑部分以堑顶边界(有截水沟时以截水沟外边缘)为界;桥梁以桥墩(台)基础两侧边缘顶为界;隧道以3倍洞径高度处两侧外边墙横向投影宽度为界

d —围护带宽度,高速公路、一级公路宜取 10m,桥梁隧道 20m

D' —采空区覆岩移动影响宽度,水平煤层可按下列式计算

$$D' = 2(h \cot \varphi + H \cot \delta)$$

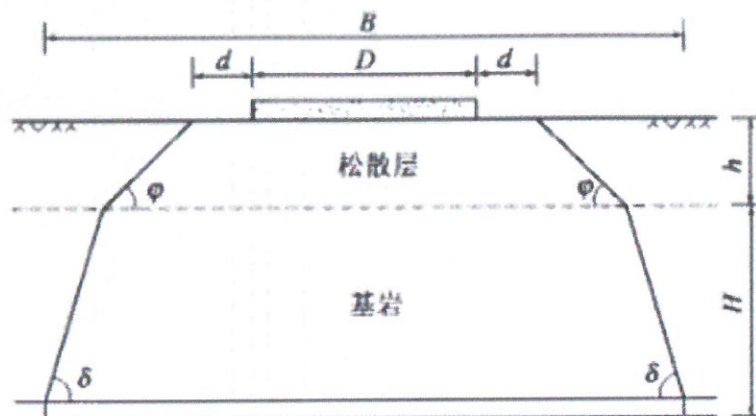
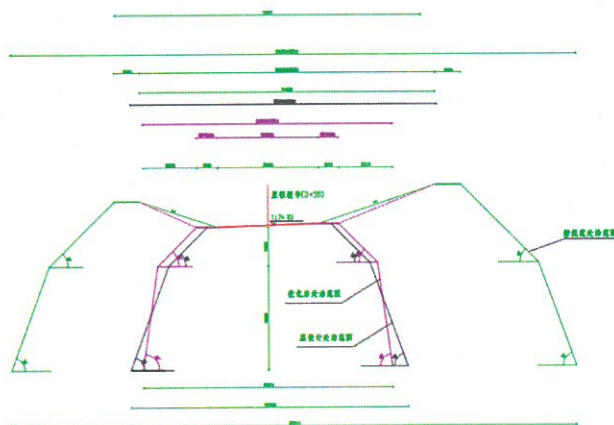


图 3.3 水平煤层采空区处治宽度计算简图

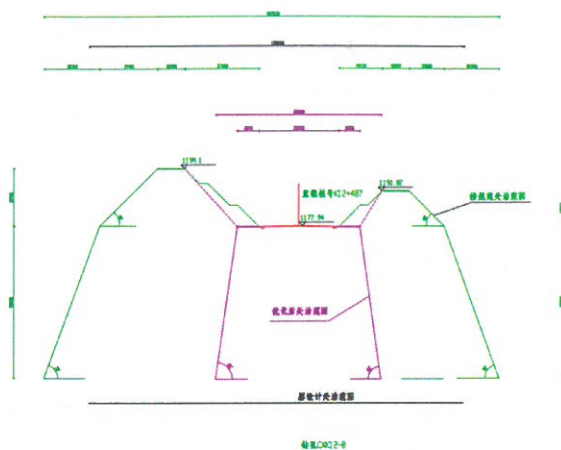
方案①（原方案）：

原设计方案主线路基宽度以外连续设置路堑边坡，根据规范，计算路基采空区宽度时，需以路堑边坡顶边界(有截水沟时以截水沟外边缘)为界，向两侧分别外扩 8-10m 围护带，在此基础上，根据岩层移动角（松散层按 45 度，基岩按 70 度）和煤层埋深计算路基处治宽度，如图 2-3 绿色线所示范围。



	路基宽度	围护带宽度	构筑物宽度	松散层移动角	基岩移动角	处治宽度
原设计（白色）	35m	5m	0m	45°	70°	118.1m
按规范处治范围（绿色）	35m	10m	75m	45°	70°	218.1m
优化后处治范围（紫色）	35m	8m	0m (设置截水沟等结构)	45°	82°	96.27m

图 3.5 立交互通 E0+500 里程路堑边坡处治范围对比

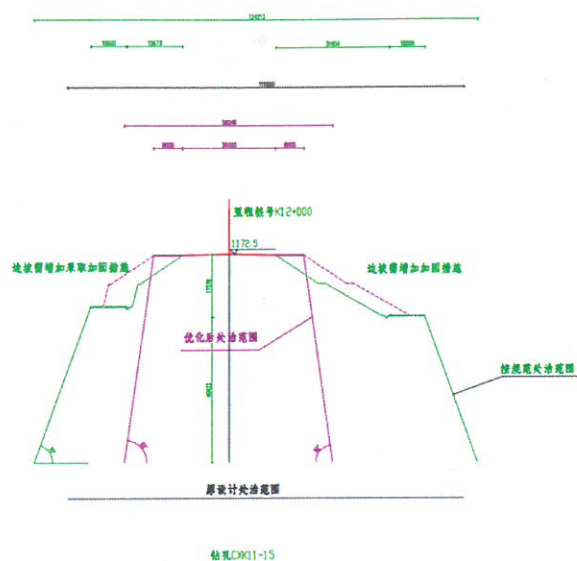


	路基宽度	围护带宽度	构筑物宽度	松散层移动角	基岩移动角	处治宽度
原设计 (白色)	29.2m					139m
按规范处治范围 (绿色)	29.2m	10m	43.5m	45°	70°	167.5m
优化后处治范围 (紫色)	29.2m	8m	0m (建筑基线防护带外)	45°	82°	60.9m

图 3.6 主线 K12+487 里程路堑边坡处治范围对比

方案② (优化方案) :

优化设计方案考虑主线路基宽度以外非连续设置路堑边坡, 在路基宽度以外设置 8-10m 围护带, 此时, 路基两侧围护带宽度内不存在路堑边坡, 边坡可不按路基构筑物计入采空区处治范围。根据规范, 计算路基采空区宽度时, 只需以围护带外侧边界为界, 再根据岩层移动角 (松散层按 45 度, 基岩按 82 度) 和煤层埋深计算路基处治宽度, 如图 2、图 3 洋红色线所示范围。此时需考虑额外增加的费用可能为围护带宽度内新增的挖方量以及新形成路堑边坡坡率下边坡的处治措施费用。



	路基宽度	防护带宽度	构筑物宽度	松散层移动角	基岩移动角	处治宽度
原设计(白色)	26.0m					111m
按规范处治范围(绿色)	26.0m	10m	47.6m	45°	70°	124.2m
优化后处治范围(紫色)	26.0m	8m	0m (边线在防护带以外)	45°	82°	58.2m

图 3.7 主线 K12+487 里程路堤边坡处治范围对比

对于路堤边坡，按照上述优化思路，在路基宽度以外设置 8-10m 维护带，再根据岩层移动角（松散层按 45 度，基岩按 82 度）和煤层埋深计算路基处治宽度，如图 4 所示，此时可看出路堤边坡坡脚仍在采空区处治范围以外，采空区对路基仍存在很大的威胁，故对于主线路堤边坡不建议采用优化方案。

根据初步测算，K12+000 以后不处治的情况下，互通区长度 600m，互通区以外路堑边坡长度 660m，路堤边坡长度 140m，路堤边坡不进行优化，主线及互通区路堑边坡在原设计的基础上按平均 30m 处治范围进行优化，预计可节约处治范围 37800m²。

(2) 不同治理宽度路基结构安全评价与稳定性分析

在满足工程安全的条件，对规范给出的岩层移动角进行优化，探

究 70° 、 82° 、 85° 、 88° 四种工况的治理范围, 通过物理相似模拟和数值模拟相结合的手段, 模拟其安全稳定性。同时, 探讨全充填、部分充填(墩台式充填、条带式充填、点式充填等), 离层注浆等加固方式下路基结构的稳定性, 结合依托工程, 现场开展试验段工作, 对优化设计理论进行现场验证。

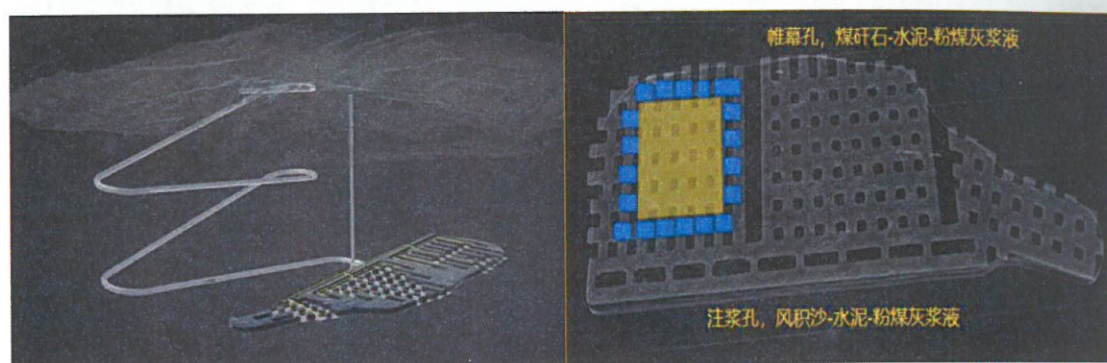
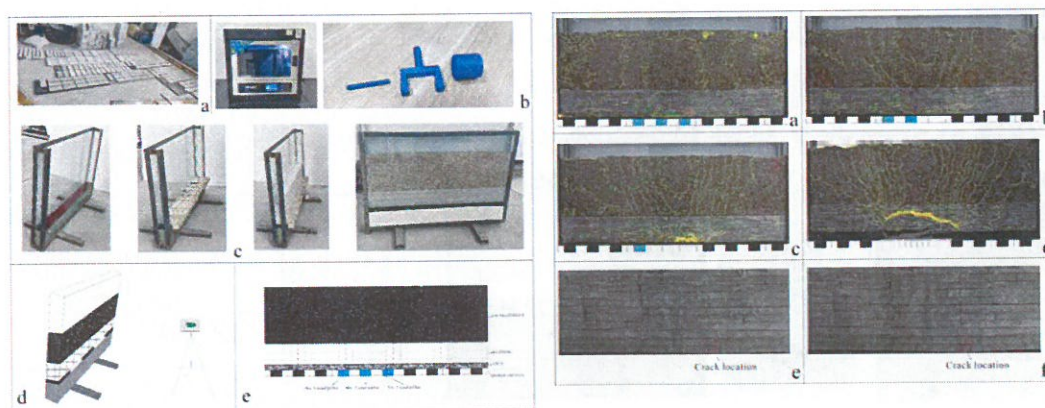


图 3.8 房柱式采空区示意图

◆ 大锦高速房柱式采空区覆岩移动变形规律物理模型实验

◆ 几何相似比: 1:50

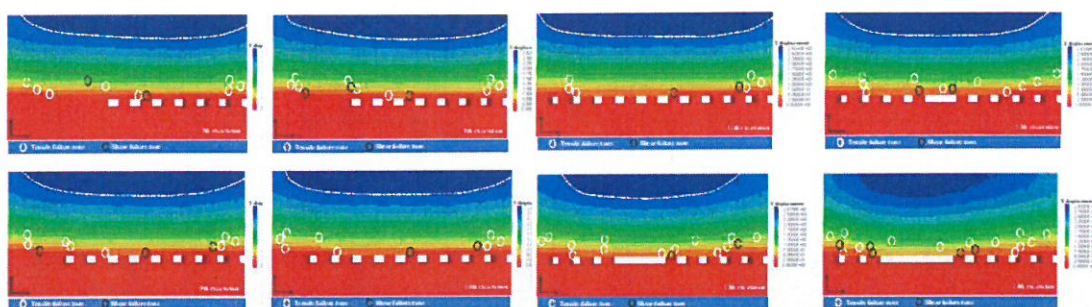


探究浅伏厚基岩小窑采空区回采岩层移动变形特征及地表沉陷规律

图 3.9 物理模拟实验方案

◆大锦高速房柱式采空区覆岩移动变形规律数值模拟

◆几何相似比: 1:1



◆房柱式开采, 相对于长壁开采, 地表变形大大降低

◆采空区的煤柱失稳, 会诱发地表开裂、地面沉陷、塌陷等灾害

图 3.10 数值模拟实验方案

研究内容三: 采空区重载路基动力特性试验研究

研究循环荷载作用下采空区带状充填路基动力响应研究, 建立工程构筑物(路基)与采空区充填-非充填相互关系模式, 采用数值模拟、物理相似模拟及现场试验的方法, 研究汽车荷载大小及频率对不同埋藏深度和处治宽度条件下的采空区上覆岩层及高速公路地面变形和力学特性的影响。



图 3.9 采空区重载路基动力特性试验物理模拟实验研究

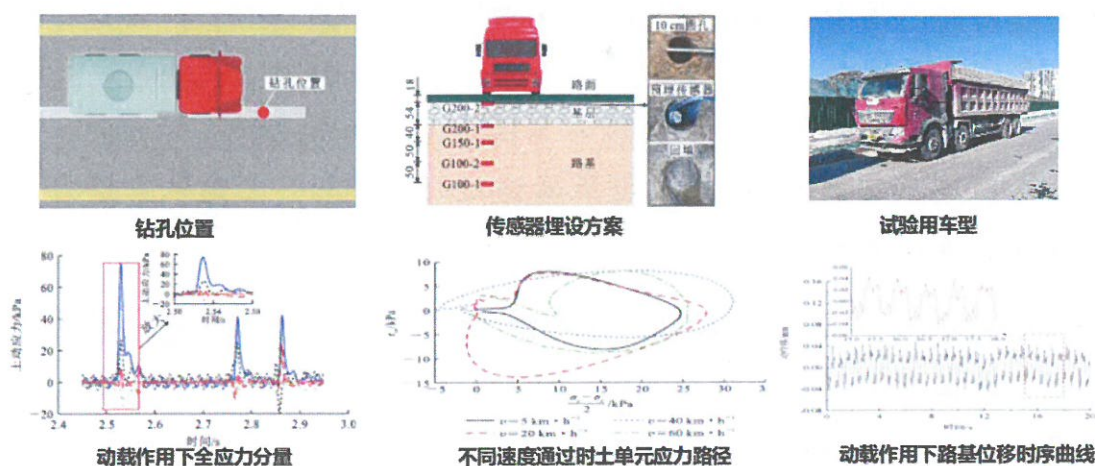


图 3.10 采空区重载路基动力特性试验现场实验研究

研究内容四：房柱式采空区地下腔体体积探测及三维重建

在房柱式采空区 (Room-and-Pillar Goaf) 的治理中，腔体体积的精确探测与三维重建是注浆充填工程的“眼睛”。房柱式采空区由于保留了大量的矿柱，结构复杂且易发生应力失稳，传统的“一钻见底”式推算早已无法满足精细化治理的需求。

由于房柱式采空区通常存在积水、冒落碎石或有害气体，探测技术已从“物理接触式”转向“非接触数字化”。三维激光扫描技术 (CMS/LiDAR)：原理：通过钻孔将激光扫描探头伸入空区，进行 360° 全景扫描。优势：厘米级精度，能够捕捉复杂的矿柱形状和顶板冒落迹象。局限无法穿透水体，若空区积水较深，需配合水下声呐。钻孔电视与全景摄影：利用高倍率全景摄像头对钻孔周边进行影像采集。虽不能直接得出体积，但它是校核三维模型纹理、判断围岩破碎程度的重要参考。物探辅助手段：瞬变电磁法 (TEM) 与高密度电法：用于圈定大致的含水/空区范围。地质雷达 (GPR)：适用于浅埋深采空区，探测顶板离层情况。获取点云数据 (Point Cloud) 后，如何将其转化为可计算的几何模型是研究的难点：

(1) 数据预处理

去噪处理：剔除由于粉尘、水汽或遮挡物产生的离散点。

多站位拼接：房柱式采空区往往被矿柱分隔，需通过多个探测孔

的数据进行“合龙”拼接。

(2) 建模算法

不规则三角网 (TIN)：将点云通过 Delaunay 三角剖分连接，形成表面连续模型。

体素建模 (Voxel Modeling)：将空间划分为微小单元，适用于计算充填率和浆料流散模拟。BIM/CAD 融合：将实测模型与原始开采图纸对比，分析矿柱的剥蚀程度。



图 3.11 采空区探测与三维重建方案

实施方案：地质调查与测点布设（前期准备）资料调绘：收集原始采掘工程平面图，初步圈定矿柱位置、采空区边界及理论埋深。地面排查：采用地面瞬变电磁法 (TEM) 或高密度电法进行大面积扫面，确定异常区（疑似空洞、积水区）。探测孔布设：在异常区核心及矿柱间隙布置探测钻孔，确保钻孔能覆盖主要的腔体空间，单孔控制半径建议为 15-25 米。第二阶段：井下腔体三维探测（数据采集）全景影像采集：利用高清钻孔电视对孔壁进行扫面，判定顶板岩层完整性及裂隙发育情况。三维激光扫描 (CMS)：将三维激光探头通过钻孔下放至腔体。执行全空间扫描，获取腔体表面高密度点云数据。水下/复杂环境探测：若腔体存在积水，同步启用水下声呐探测仪，获取水面以下的地形数据。第三阶段：多源数据处理与三维重建（模型构

建)点云精处理:采用统计离群点移除(SOR)算法剔除粉尘、水汽噪点,并进行坐标转换,将本地坐标统一至国家大地坐标系。多站位点云拼接:针对被矿柱隔断的多个腔体,利用ICP(迭代最近点)算法将相邻探测孔的数据进行高精度无缝拼接。曲面重构与体积计算:采用Delaunay三角剖分或Poisson重建算法生成三维网格模型。体积量化:计算空区闭合体积,并结合冒落区岩石的碎胀系数(SK_p),精准估算注浆有效容积。第四阶段:稳定性评估与注浆方案输出(工程应用)数字孪生对比:将重建模型与原始开采图叠加,识别矿柱剥蚀削减严重的危险区域。注浆辅助设计:在三维模型中模拟浆料流散规律(扩散半径)。优化注浆孔间距,确立封堵墙(止浆墙)的位置。成果交付:输出三维可视化模型、剖面图、体积计算表及安全性评价报告。

研究内容五:全固废注浆材料研发及灌注一体工程应用

(1)改性水泥-粉煤灰-风积沙-煤矸石复合材料力学特性及适用性评价研究

围绕大锦高速沿线风积沙、煤矸石、粉煤灰等固废为研究对象,通过室内研究、现场试验等手段,利用多源固废材料的化学成分和矿相组成的协同效应来制备多源固废胶凝材料。探索不同质量比和水固比下,这些材料的浆料性能和单轴抗压强度。此外,通过微观试验分析这些材料的工作力学性能,以及影响其性能的因素,目的是提高材料在采空区注浆领域的应用性能,促进环境质量的改善、成本的节约,以及经济的全面绿色转型。

(2)采空区灌注一体施工关键参数及工艺

深入研究采空区灌注一体施工的关键参数,如改性固废材料的强度、流动性、抗渗透性,以及最佳的浆液比例,以获得适当的流动性和硬化性能、填充的均匀性、抗渗透性和抗压强度等性能,确保浆液



在采空区的可注性,并建立充填过程的实时监测与控制系统,重点关注施工过程的实时监测和控制,以保证施工质量和充填体的性能,减轻地表沉陷,保护地表环境,并提高采空区的稳定性。

(3) 不同工况、不同开采条件下注浆材料及工艺优化研究

规范规定浆液技术指标:

注浆孔采空区注浆充填材料检测指标: ①锥桶流动度 ($<30s$)
②扩展度 ($>500mm$) ③浆液状态稳定, 不离析 ④结石率 ($\geq 90\%$)
⑤结石体 7d 抗压强度 (路基下伏采空区 $\geq 0.6MPa$, 桥隧下伏采空区 $\geq 2.0MPa$)

帷幕孔采空区充填材料检测指标: ①塌落度 ($>200mm$) ②扩展度 ($>500mm$) ③拌和物状态稳定, 不离析 ④结石率 ($\geq 98\%$) ⑤结石体 7d 抗压强度 (路基下伏采空区 $\geq 0.6MPa$, 桥隧下伏采空区 $\geq 2.0MPa$)

根据前期全固废注浆材料的研究成果,针对项目沿线查明的采空区不同埋深、不同地质条件、不同开采条件,结合公路采空区处治技术细则的相关技术指标,进一步对全固废注浆材料的配比和浆液性能指标进行优化,并且根据注浆孔和帷幕孔的流动性、凝结时间的指标要求的不同,研究不同的浆液,最终形成安全可靠、分段治理、性价比高的处置方案。

在全固废类采空区注浆材料研发过程中,重点开展煤矸石活性激发机理研究。

①微观表征测试: 引入扫描电子显微镜 (SEM) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 测试手段,对不同激发条件下浆体固化物的微观形貌、矿

物组成及晶体结构进行表征。

②机理分析:通过分析水化产物种类及微观孔隙结构演变,揭示煤矸石活性激发的化学-物理机制,建立微观结构与宏观力学性能(强度、耐久性)的关联模型,为材料配比优化提供理论依据。

(4) 采空沉陷区公路路基治理效果评价

注浆处置后的效果检测,可通过钻孔取芯、波速测试、结实体强度对处理效果进行检测,必要时还可通过地表变形监测等手段,建立采空区公路路基处治效果的综合评价体系。

① 钻孔取芯:通过全孔取芯直接观察采空区的浆液充填情况,主要检测浆液对采空区和断裂带的充填率,直观定性评价注浆的质量。主要检测浆液对采空区和裂隙带的充填率及注浆浆液的结石率。通过全孔取芯直接观察采空区的浆液充填情况,并结合钻探过程中钻进速度、循环液的消耗情况、孔内静止水位观测结果及孔壁的稳定性等,直观定性评价注浆的质量。

② 波速测试:通常情况下,孔内波速检测有单孔法和跨孔法,本项目采空区检测可采用单孔法,单孔法又分为弹性波速度测井和剪切波速度测井,两者各有优缺点,在现场检测过程中需要根据实际情况配合使用。

③ 孔内电视:孔内电视可以直观地观察孔壁岩体的空洞、裂隙、浆液的充填情况以及岩体的完整程度,根据图像的形态、颜色及光亮等信息,综合评价采空区的处治效果。

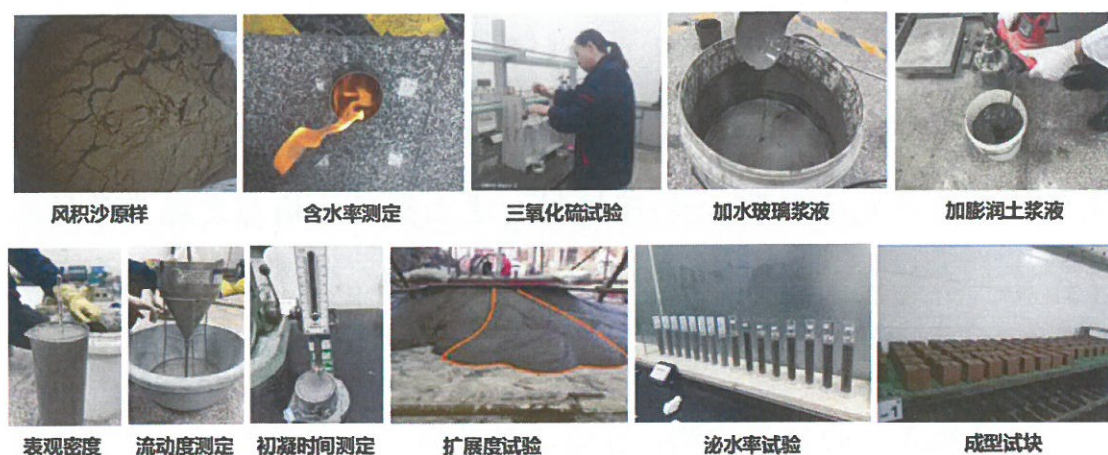


图 3.12 注浆液制备流程

(5) 打造采空区全固废灌注一体精准处治优化设计示范样板

本课题依托大柳塔至锦界高速公路项目，勘察设计前期发现问题并科研前置，通过“采空区精细化物理探测及残余变形特征研究、浅伏厚基岩采空区治理宽度参数优化及稳定性评价研究、全固废注浆材料研发及工程应用研究、采空区重载路基动力特性实验研究、重载高速公路下房采区精准探测及处治技术研究”等内容的研究，将研究成果用于指导设计，为项目采空区处治优化设计提供科学参考。并且将项目打造成集“精细化探测、绿色低碳、经济低成本、高效安全可控、技术标准创新”的高速公路穿越采空区处治的示范样板工程，并且为后续省内其他公路穿越采空区处治提供科学参考和借鉴。

采空沉陷区公路路基长周期监测与运维体系架构图

Architecture Diagram of Long-term Monitoring and O&M System for Highway Roadbed in Goaf Subsidence Areas

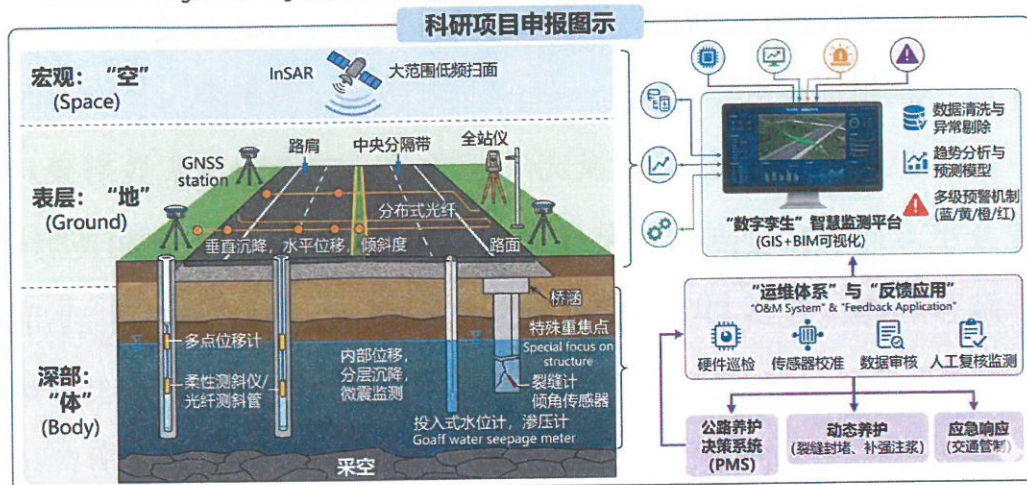


图 3.13 “实时监测-智能预警-应急处理”三位一体防控体系

3.3 技术路线

3.3.1 研究技术方案

本项目遵循“理论牵引、技术集成、试验验证、工程示范”的总体思路，采用“空天地”一体化勘察、多尺度模拟、新材料研发与现场试验相结合的综合研究方法，系统解决重载高速公路穿越浅伏厚基岩采空区的灾变响应与精准处治问题。

(1) 调查研究

对象与范围：以“大柳塔至锦界高速公路“K0+923~K4+430（昆源煤矿段）和 K10+774~K12+000（乾安煤矿段）下伏采空区为核心研究对象，并扩展至沿线类似地质条件区域。

数据内容与方法：

收集并处理研究区过去 3-5 年的哨兵 1A（C 波段）及陆地探测一号（L 波段）SAR 影像数据，采用 SBAS-InSAR 技术，获取大范围地表形变速率与时间序列，初步识别沉陷区范围与趋势。

针对采空区地表形变梯度大、传统 InSAR 相位解缠易失效的问题，本项目采用 D-InSAR 与 PS-InSAR 组合监测方案：

PS-InSAR 技术: 提取研究区内高相干永久散射体点 (PS 点), 构建线性形变模型, 获取高精度背景沉降趋势, 作为形变监测的“基准骨架”和相位解缠控制点。

D-InSAR 技术: 针对剧烈沉降区域, 选取短时空基线影像对进行差分干涉处理, 重点捕捉大梯度形变信息, 减少时空去相关影响。

融合解算: 建立 D-InSAR 与 PS-InSAR 数据融合模型。利用 PS 点的高可靠性相位信息, 校正 D-InSAR 在剧烈形变区的相位解缠路径, 解决相位跳变问题; 同时利用 D-InSAR 的面域监测能力, 填补 PS 点稀疏区域的监测空白, 实现“点面结合”, 确保剧烈形变区监测数据连续可靠。

精细化地形数据: 对重点区段实施机载 LiDAR 扫描, 获取高精度数字高程模型 (DEM) 与三维地表模型, 识别微小地裂缝与塌陷坑。

地质与采矿资料: 系统收集区域地质图、矿井分布图、开采层位、采煤方法、停采时间等历史资料, 通过走访当地居民与相关部门, 核实小煤窑开采历史。

地球物理勘探: 在 InSAR 识别出的异常区及关键构造物下方, 布置等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 测线, 总长度预计不少于 10 公里, 结合高密度电阻率法, 精细探测地下 50-100 米深度范围内采空区、裂隙带的空间展布。

钻探验证与监测: 针对物探异常区, 布置验证钻孔不少于 20 个, 进行岩芯编录、采空区深度与高度测量、孔内电视观测。同时, 布设 GNSS 监测点 10-15 个, 与 InSAR 结果进行交叉验证与校准。

(2) 调查研究室内外试验

材料研发试验:

试验种类：固废基注浆材料配合比优化试验、浆液工作性能试验（流动度、塌落度、泌水率、凝结时间）、结石体力学性能试验（单轴抗压强度、收缩率）、耐久性试验（干湿循环、冻融循环）。

规模与方案：设计不同水泥、粉煤灰、风积沙、煤矸石质量比及水固比的配比方案不少于 30 组。采用标准水泥胶砂试验方法，制作试件每组不少于 6 个，分别测试 7d、28d、90d 强度。通过扫描电镜（SEM）、X 射线衍射（XRD）进行微观结构分析。

物理模型试验：

试验种类：浅伏厚基岩房柱式采空区开采及失稳模拟试验、注浆充填过程模拟试验、循环荷载下处治路基动力响应试验。

规模与方案：建立几何相似比 1:50 的平面应力模型试验台 1 套。模拟煤层开挖、煤柱破坏、地表沉陷全过程；随后模拟不同注浆模式（全充填、墩台式）的处治效果；最后通过加载系统模拟重载交通的循环荷载，监测覆岩应力、位移及路基动力变形。

（3）理论与数值分析

依据的理论：开采沉陷学（概率积分法、关键层理论）、岩体力学、弹塑性理论、流体动力学（浆液扩散理论）、结构动力学。

分析方法与创新：

沉陷动态预测模型：融合改进的 Knothe 时间函数与概率积分法，创新性地引入 InSAR 时序形变数据作为边界条件与校正参数，构建能反映老采空区“活化”特征的时空动态预测模型。

精细化三维反演：针对 OCTEM 等物探数据，创新性地应用卷积-双向长短时记忆网络（CNN-BiLSTM）深度学习算法进行三维反演，提升采空区形态与边界识别的精度和效率。

治理宽度优化分析：基于数值模拟（FLAC3D/UDEC），系统研

究不同岩层移动角（70°、82°、85°、88°）及不同注浆加固模式（全充填、条带式）下，路基的稳定性与应力变形场。提出考虑浆液结石体强化效应和经济性的移动角优化建议与治理宽度计算公式。

多场耦合数值模拟：建立“路基-处治体-采空区覆岩”耦合模型，分析在车辆循环荷载与地下水耦合作用下的长期动力稳定性，明确灾变阈值。

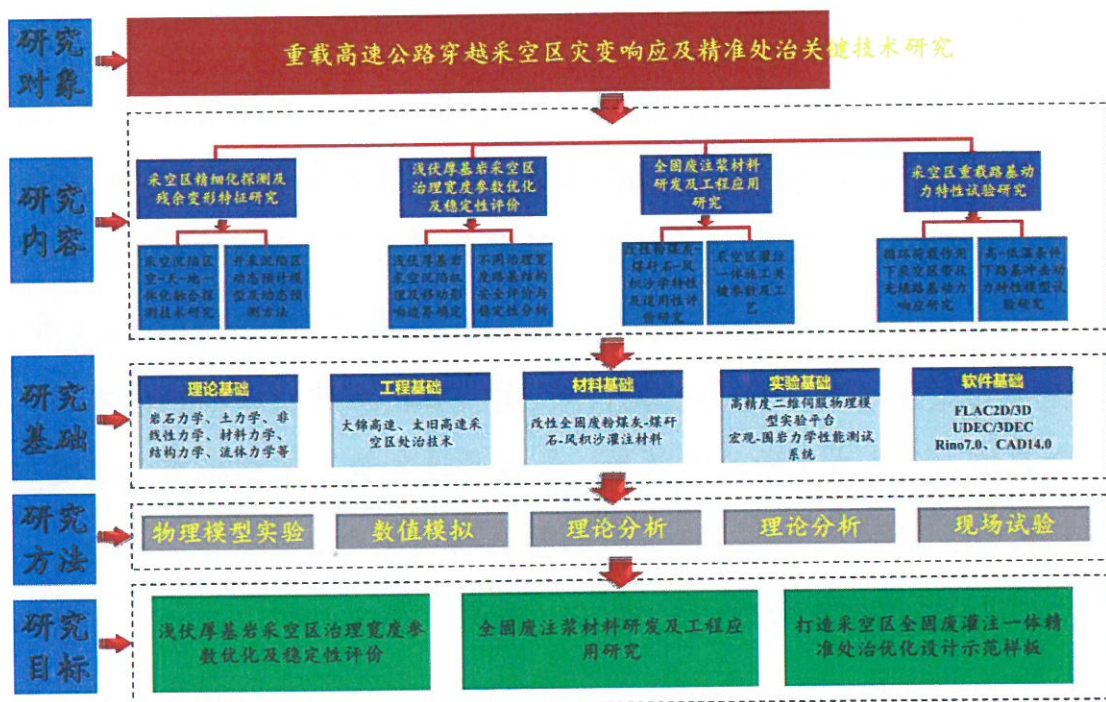


图 3.12 技术路线图

3.3.2 工作流程

本项目整体工作流程是一个多阶段迭代、验证与集成的系统工程，具体流程如下图所示：

阶段一（数据采集与融合）：通过多技术手段获取基础数据，并融合处理形成统一的时空信息基础，为后续研究提供输入。

阶段二（机理研究与模型构建）：理论研究、试验研究、数值分析三者并行且相互校验。理论研究为试验和模拟提供框架；试验结果为理论和模拟提供参数与验证；数值模拟拓展试验范围，预测各种工况。三者协同产出初步的处治技术方案。

阶段三(技术集成与现场验证): 将初步方案应用于现场试验段, 进行实体工程验证。通过严密的监测网络收集效果数据, 并反馈至研究阶段。这是一个关键的“迭代优化”环节, 确保技术方案的可靠性。

阶段四(成果固化与示范): 经验证优化的技术, 被系统总结为设计指南、施工工法、专利等有形成果, 并通过示范工程展示其综合效益, 最终完成项目闭环, 实现成果转化与推广。

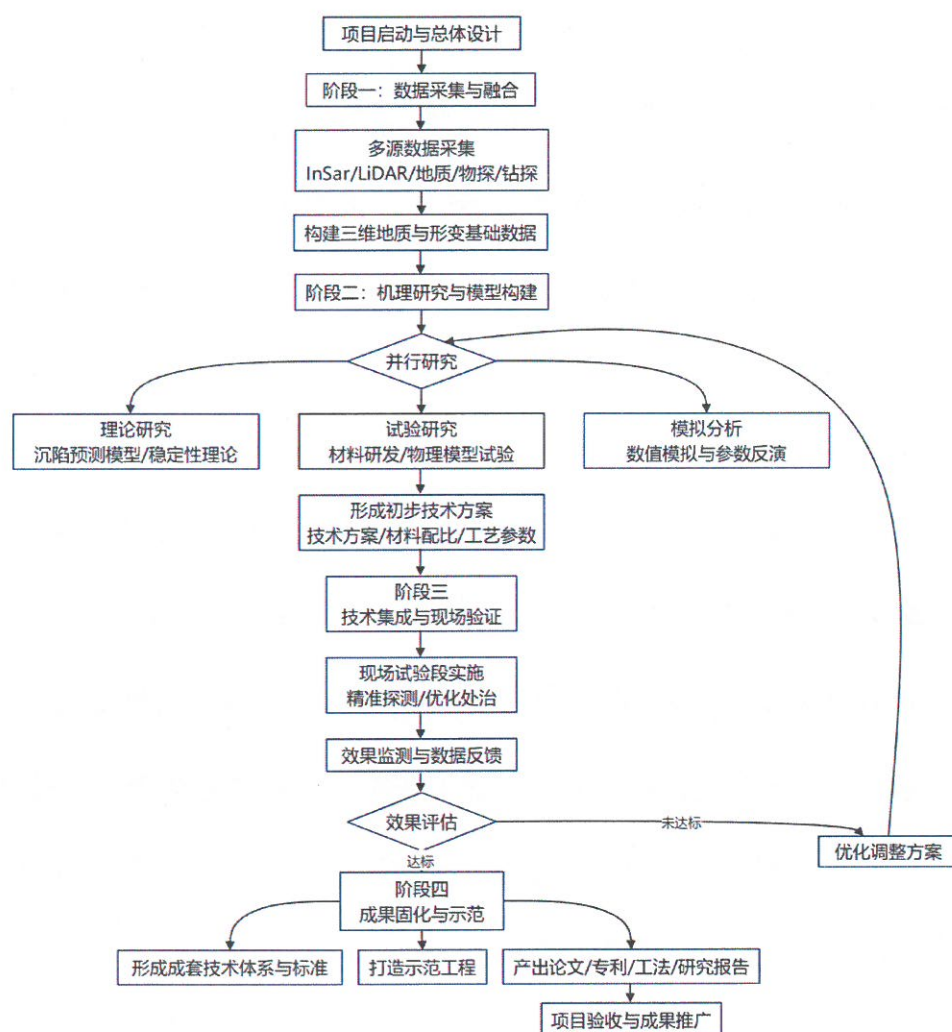


图 3.13 工作流程图

3.4 后续技术改造

后续技术改造或基本建设计划的衔接(项目研究的成果提出的技术或理论可供实际对象应用的推测,在一定程度上反映成果的成熟性

和市场需求情况)

本项目研究成果不仅可以解决大柳塔至锦界高速公路(大锦高速)面临的采空区工程难题,更致力于形成一套可复制、可推广的成套技术体系,推动行业技术进步。研究成果将在以下层面与后续技术改造及基本建设计划实现深度衔接与应用:

3.4.1 与本项目依托工程的直接衔接与应用

设计优化与施工指导:研究成果将直接反馈并应用于大锦高速采空区路段的施工图优化设计与现场施工。具体包括:

采用优化的岩层移动角(如 82°)重新核算并缩减处治范围,直接降低工程量和造价。

应用研发的改性水泥-粉煤灰-风积沙全固废注浆材料及其配比方案、灌注一体施工工艺与质量控制标准,指导现场注浆施工,确保处治效果并节约材料成本。

运营养护技术支持:项目建立的“空天地”一体化监测技术体系与路基治理效果评价体系,可在高速公路运营期转化为长期健康监测系统,对处治后的采空区路段进行持续稳定性评估与预警,为养护决策提供科学依据,防范“活化”风险。

3.4.2 对行业标准与规范体系的补充与提升

本项目形成的《公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南》、施工工法以及关于浅伏厚基岩采空区治理宽度优化、稳定性评价等方面的研究成果,具有普遍的参考价值。

这些成果可提交至交通运输行业主管部门及标准编制单位,作为

未来修订《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG/T D31-03)等相关行业标准、地方标准的重要技术依据和案例支撑,推动行业设计理念与处治技术的更新换代。

3.4.3 在陕西省及全国类似工程中的推广应用前景

省内衔接:陕西省榆林、延安等煤炭资源富集地区,存在大量已建、在建或规划的高速公路及国省干线穿越采空区的问题。本项目形成的“精准探测、绿色处治、经济优化、智能监测”成套技术,可率先在陕西省内同类工程中推广应用,例如后续规划的矿区公路、国省道改扩建项目等,服务于全省交通基础设施的安全建设与绿色可持续发展。

全国推广:我国山西、内蒙古、贵州等多个资源型省份均面临类似的“采空区与交通建设矛盾”。本项目以重载交通为背景,研究成果针对性强、技术体系完整,具备向全国类似地质条件和工程需求的地区进行技术输出和工程示范的潜力,市场应用前景广阔。

3.4.4 推动相关产业技术升级与产业链延伸

新材料产业:全固废注浆材料的成功研发与工程应用,为区域内粉煤灰、煤矸石、风积沙等大宗工业固废的资源化、高值化利用开辟了新的技术路径和市场需求,可带动地方环保材料产业发展。

高端装备与技术服务:项目集成的等值反磁通瞬变电磁法(OCTEM)装备、智能化注浆监控系统等,将对高端工程勘察、检测仪器装备的研发与应用起到推动作用,提升相关技术服务行业的技术水平。



本项目研究起点于具体工程难题,但目标定位于形成系统性的行业解决方案。研究成果兼具理论创新性、技术先进性和工程实用性,成熟度较高。通过在本项目的成功示范,预计相关技术可在“十四五”后期及“十五五”期间陕西省乃至全国的基础设施建设,特别是资源型地区交通网络优化、城市群快速通道建设中,得到实质性的大规模应用与推广,实现科研价值向工程效益和社会效益的有效转化。

3.5 技术经济指标

本项目研究成果将形成一系列具体、可量化考核的技术与经济指标,确保成果的先进性、实用性与可推广性。指标分为技术性能指标和经济性指标两大类,以定量指标为主,定性描述为辅。

3.5.1 技术性能指标

(1) 采空区精细化探测与识别技术指标

探测精度:

融合 InSAR 技术的地表形变监测精度: $\leq 5 \text{ mm}$ (均方根误差, RMS)。

等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 反演采空区空间位置 (顶底板深度) 的绝对误差: $\leq \pm 1.5 \text{ m}$ 。

采空区平面边界划定的精度: $\leq \pm 3 \text{ m}$ 。

识别能力: 能够识别出埋深 10-100 m、空洞高度 $\geq 0.5 \text{ m}$ 的采空区或大裂隙带,对老采空区“活化”微变形的年速率监测灵敏度达到 3 mm/年 。

(2) 全固废注浆材料性能指标

浆液工作性能:

注浆孔浆液: 初始流动度 (马氏漏斗) $\leq 30 \text{ s}$; 扩展度 $\geq 550 \text{ mm}$; 初凝时间可调范围 4-12 h; 泌水率 $\leq 3\%$ 。

帷幕孔浆液：塌落度 ≥ 220 mm；扩展度 ≥ 500 mm；和易性良好，不离析。

结石体力学与耐久性能：

标准养护条件下，结石体 7 天无侧限抗压强度：路基下 ≥ 0.8 MPa，桥隧构造物下 ≥ 2.2 MPa；28 天强度分别 ≥ 2.0 MPa 和 4.0 MPa。

体积收缩率： $\leq 3\%$ （28 天）。

渗透系数： $\leq 1 \times 10^{-6}$ cm/s。

固废掺量（粉煤灰+风积沙+煤矸石占固相总质量比）： $\geq 70\%$ 。

（3）采空区处治设计优化指标

治理范围优化率：针对浅伏厚基岩（埋深 < 100 m）老采空区，在保证路基长期稳定安全（安全系数 $FS \geq 1.3$ ）的前提下，通过优化岩层移动角，使治理面积较现行规范（移动角 70° ）计算值减少 15%-30%。

处治后路基稳定性指标：数值模拟及评估表明，处治后在设计重载交通荷载（轴载 130kN，年均日交通量 ≥ 30000 辆）及地下水耦合作用下，路基工后沉降控制值： ≤ 50 mm/20 年；差异沉降率： $\leq 0.1\%$ 。

3.5.2 技术经济性指标

（1）直接经济效益（对比传统处治方案）

材料成本节约：研发的全固废注浆材料，利用大宗工业固废，综合材料成本较传统水泥-粉煤灰浆液降低 20%-30%。按本项目处治方量估算，可节约材料费用约 400 万元。

处治工程量节约：通过治理宽度优化，预计减少注浆钻孔总进尺 15%-25%，减少注浆方量 10%-20%。直接节约工程造价 不低于 20%。以大锦高速示范段为例，预计可节约处治工程直接费用约 800 万元。

工期缩短：采用“精准探测+定点注浆”一体化技术，避免盲目布孔和无效注浆，预计可缩短采空区处治专项工期 10%-15%。

(2) 全生命周期成本与社会环境效益

养护成本降低：通过精细化处治和长期监测预警，可显著降低运营期因采空区“活化”引发病害的养护维修频率与成本，预计全生命周期养护成本可降低 30%以上。

固废资源化效益：每应用 1 立方米 全固废注浆材料，可消纳粉煤灰、风积沙等固废 0.7-0.8 吨，减少水泥消耗 0.2-0.3 吨，折算减少二氧化碳排放约 0.2 吨。

土地资源节约：优化治理范围可减少对地表植被的破坏和临时征地，社会与环境间接效益显著。

(3) 成果应用推广预期指标

技术成果形式：形成 1 部技术指南（《公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南》）、1 套施工工法（申报省级或行业工法）、申请发明专利 3-5 项、发表核心期刊及以上论文 3-5 篇。

示范工程规模：在本项目依托工程中，打造至少 2 处、总长度不少于 1 公里的“精准探测-绿色处治-智能监测”集成示范段。

潜在推广价值：本成套技术适用于中西部类似地质条件的矿区公路建设，预计未来 5 年可在省内 2-3 个 重大交通项目中推广应用，累计创造直接经济效益超过 5 千万元，并为行业提供可靠的技术储备。

四、项目承担单位及参加单位概况

4.1 单位概况

项目承担单位：陕西大锦高速公路管理有限公司，成立于 2023 年 3 月 17 日，独立法人公司，由榆林市天元路业有限公司与陕西交通控股集团有限公司（联合体牵头人）、陕西交控投资集团有限公司、陕西交控市政路桥集团有限公司、陕西高速机械化工程有限公司、陕

西现代公路机械工程有限公司、陕西高速诚信交通工程有限公司、陕西交通电子工程科技有限公司、中铁五局集团有限公司、中铁三局集团有限公司组成的联合体，共同出资组建。公司具体负责大柳塔至锦界高速公路暨包茂联络线的投资、建设、运营等工作。

公司设综合管理部、融资财务部、工程管理部、合同管理部、质量安全部、征迁环保部、纪检监察室等7个职能部门，现有在职员工21人。

项目参加单位：

(1) 陕西交控建投经营管理有限公司，负责对省内新建、改扩建、特许经营等交通基础设施工程项目实施全面管理，以“行业需求、市场需求”为引领，深化工程技术创新与研发落地应用，延长交通基础设施产业链条，打造服务公路建设行业发展的“科技服务商、技术新高地”。

公司近年来针对工程技术重点、难点，开展原创性、前沿性科技攻关，固化形成一批成套关键技术成果。已发布实施交通运输行业标准2项、陕西省地方标准35项、团体标准2项；取得国家知识产权局专利证书47项，计算机软件著作权登记证书25项；获得国家科技进步奖一等奖1项、二等奖3项，陕西省科技进步一等奖3项、二等奖25项、三等奖35项，中国公路学会特等奖1项。目前，承担省交通运输厅《装配式桥梁绿色智能建造关键技术研究及产业化》等10余项科研项目研究任务。

(2) 山西交通科学研究院集团有限公司（以下简称交科集团）是山西交通控股集团有限公司的科技型全资子公司，是集勘察设计、科技研发、智慧交通、新技术四大产业和检验检测业务为一体的国内

领先综合型交通科技企业集团，注册资本 10 亿元。

交科集团业务涉及公路、市政、建筑、城市轨道、电力等行业，提供投资决策、规划咨询、科技研发、勘察设计、项目管理、工程监测检测、运营养护、新材料研发、特种施工等领域产业链服务。

交科集团拥有高层次的科技创新平台。拥有国家、省部级各类科技创新、人才创新平台 25 个，其中院士工作站 1 个、博士后科研工作站 1 个、交通运输部重点创新团队 1 个、省重点创新团队 2 个；国家地方联合工程实验室 1 个、行业重点实验室 1 个、行业协同创新平台 2 个、交通运输部长期性能观测基地 1 个、省重点实验室 3 个、省工程技术研究中心 4 个、省工程研究中心 1 个，省产业技术创新战略联盟 1 个、省科学设备（数据）共享服务平台 3 个、省国际合作基地 1 个、其他平台（中心）2 个。共有 3000 余台（套）价值超过 2 亿元的 30000kN 橡胶支座电液伺服多通道加载系统、20000kN 重型结构多通道空间加载系统等国内领先科研仪器设备。

交科集团拥有高质量的科技创新成果。“十二五”以来，完成各级各类科研项目 234 项，获得国家、省部级科学技术奖励 94 项，其中省部级一等奖 16 项，二等奖 43 项，三等奖 34 项，“重载水泥混凝土铺面关键技术与工程应用”项目获得国家科技进步二等奖。授权国家专利、软件著作权 1623 项，其中发明专利 216 项。主参编国家、行业、地方等各类标准 139 部，获得山西省第一届标准创新贡献三等奖 2 项。QC 五小等成果获国家、省部级奖励 83 项。

交科集团拥有高素质的科技人才队伍。现有员工中硕士、博士学历人员占比 35.9%，正高级工程师、高级工程师占比 39.5%；一级注册建筑师、一级注册结构工程师、注册岩土工程师、注册电气工程师等各类注册人员占比 41.2%。拥有国家级尖端人才 11 人，交通运输

部第一层次中青年专家、山西省学术技术带头人、山西省青年拔尖人才等省部级高层次人才 48 人、三晋英才 138 人。外聘院士 4 人。

交科集团拥有高等级的企业资质资源。拥有工程勘察综合类甲级、测绘（工程测量）甲级、公路行业设计甲级、工程设计市政行业（道路工程、桥梁工程）专业甲级、工程设计建筑行业（建筑工程）甲级、工程咨询单位（公路、岩土工程、水文地质、工程项目管理、PPP）甲级、地质灾害治理勘察/设计/施工甲级、公路交通工程（公路安全设施、公路机电设施）专业承包壹级、建筑业企业“建筑防水、结构补强”“专业承包等咨询、勘察、设计、检测、节能环保、地质环境、信息技术、特种施工、新型材料、加工制造等各类资质 78 项，位居全国同行业前列。

（3）陕西省交通规划设计研究院有限公司成立于 1958 年，原由交通部公路勘察设计院第五分院体制下放改组成立，拥有工程设计公路行业甲级，市政行业道路、桥梁工程专业甲级，建筑行业建筑工程甲级，通信广电行业电子系统工程甲级，工程勘察综合甲级，地质灾害治理工程勘察、设计及危险性评估甲级，测绘甲级，工程监理甲等 25 项资质，主要从事各等级公路、桥梁、隧道、交通工程、港口码头、民用建筑、市政工程的勘察设计及公路交通规划、工程可行性研究、遥感与地理信息技术应用、工程地质勘探、材料试验、工程技术咨询、工程监理等业务。全院承担了全省 85% 以上高速公路项目的工程可行性研究和 70% 以上高速公路项目的勘察设计工作。公司自建院伊始，一直致力于交通行业新技术、新材料的研发应用，结合生产实际，先后承担了包括“黄土地区公路高边坡防护技术”、“陕西省交通卫星遥感影像及信息系统研制”、“建筑垃圾在公路工程中规模化综合利用的关键技术研究”和“公路中小跨径钢-砼组合梁桥建造

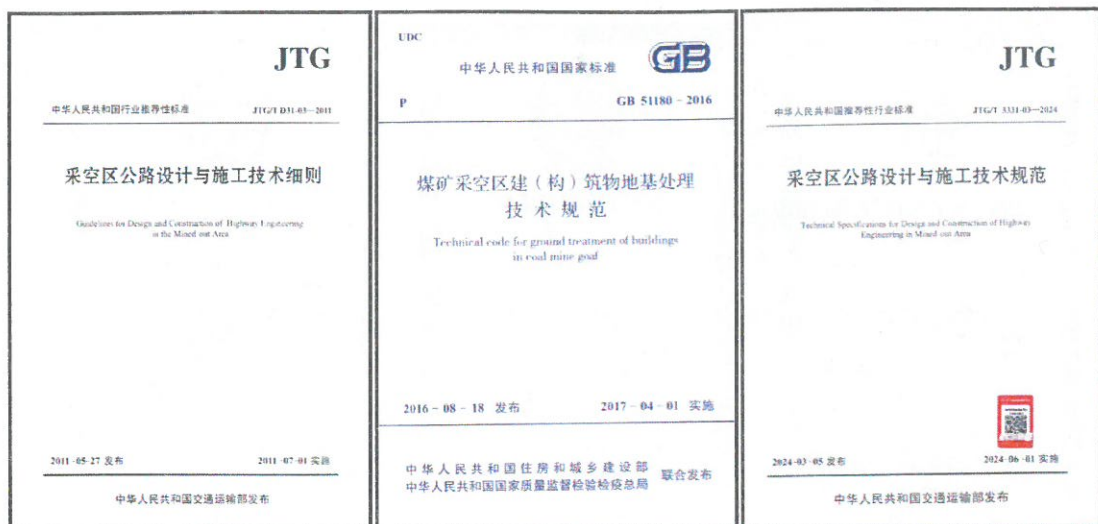
关键技术研究“等交通运输部及陕西省交通科技项目近百余项。在公路、桥梁、隧道、遥感、航测、GIS、北斗卫星、BIM 等技术领域取得大量创新成果，荣获交通部科技进步奖、陕西省科学技术奖等奖项 25 项。

部分相关成果如下：

- (1) 中国公路学会科学技术一等奖《公路采空区处治成套技术研究》
- (2) 山西省科技进步二等奖《桥隧下伏采空区处治关键技术研究》
- (3) 山西省科技进步二等奖《采煤沉陷区地质灾害形成机制及其综合防治技术研究》



- (4) 《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG/T D31-03-2011)
- (5) 《煤矿采空区建(构)筑物地基处理技术规范》(GB 51180-2016)
- (6) 《采空区公路设计与施工技术规范》(JTG/T 3331-03-2024)
- (7) 《公路工程地质勘察规范》(JTG C20-2011)



(8) 陕西省煤炭工业优秀科技成果二等奖《西部生态脆弱区浅埋煤层保水充填开采关键技术与应用研究》

(9) 陕西省科学技术进步二等奖《西部浅埋煤层风积沙似膏体窄条带充填开采关键技术与应用》

(10) 陕西省科学技术进步三等奖《浅埋煤层突水溃沙形成机理及防控体系研究》

(11) 陕西省科学技术进步二等奖《黄陵矿区强制非均质复合致灾水源水害防控技术研究》





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
薛保勇	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	49	正高	岩土工程	项目负责人
黄哲	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	53	高级工程师	桥梁工程	技术负责人
王丰年	山西交通科学研究院集团有限公司	男	37	高级工程师/博士	岩土工程	课题负责人
张国庆	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	48	高级工程师	桥梁工程	课题负责人
张文涛	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	42	高级工程师	公路工程	现场负责
尉茂森	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	39	高级工程师	岩土工程	现场协调
师永翔	山西交通科学研究院集团有限公司	男	39	正高级/博士	岩土工程	技术负责人
任怀斌	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	43	高级工程师	岩土工程	现场负责
刘斌	陕西省交通规划设计研究院有限公司	男	34	高级工程师	岩土工程	技术负责人
季博	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	32	工程师	土木工程	数据处理
周子涵	陕西大锦高速公路管理有限公司	男	29	工程师	桥梁工程	现场试验
李泽玮	山西交通科学研究院集团有限公司	男	30	工程师	岩土工程	数值模拟

姓名	单位	性别	年龄	技术职称	专业	在项目中担任具体工作
董海裕	山西交通科学研究院集团有限公司	男	27	工程师	地质工程	室内试验
任宏玉	山西交通科学研究院集团有限公司	男	28	工程师/硕士	岩土工程	数值模拟
周祥文	山西交通科学研究院集团有限公司	男	35	高工/硕士	岩土工程	现场试验

4.3 各自承担的主要工作

为确保项目高效推进、优势互补，项目组依据各参与单位的核心优势与资源禀赋，进行明确的任务分工。具体承担的主要工作如下：

项目承担单位：陕西大锦高速公路管理有限公司

总体协调与项目管理：作为项目第一责任单位，全面负责项目的申报、组织实施、进度控制、经费管理及总体协调工作。负责与陕西省交通运输厅的对接，落实项目配套经费与工程依托条件。

工程现场实施与保障：提供并保障大锦高速公路采空区路段作为项目研究的实体依托工程。负责组织现场试验段的施工协调、场地提供、安全监督与外部关系协调，确保科研活动与工程建设无缝衔接。

数据提供与现场监测：负责提供项目所需的完整工程设计资料、地质勘察报告、施工记录等基础数据。配合参与单位，组织开展现场GNSS监测、施工过程数据采集及处治后的长期变形观测工作。

成果集成与工程转化：牵头组织项目研究成果在依托工程中的转化应用，负责将优化的设计方案、新材料、新工艺纳入施工管理流程。组织示范工程的打造与成果展示，推动技术标准的试点应用。

项目参加单位一：陕西交控建投经营管理有限公司

(1) 科研资源与平台支撑保障

全面开放固废高效再生利用技术院士工作站、陕西省智慧交通产业中试基地等 20 个省部级科研平台，提供试验场地、智能化检测设



备、数值仿真软硬件等科研硬件支撑，保障采空区探测、注浆材料试验、结构稳定性分析等研究顺利开展。

（2）科研成果工程化转化与落地

负责将项目研发的全固废注浆材料、精准探测技术、优化处治工艺等成果，完成中试验证与产业化适配，推动科研成果从实验室走向工程现场，实现技术成果快速转化为可施工、可验收的工程应用方案。

（3）现场技术服务与质量管控

派驻专业技术团队驻场，参与采空区处治现场试验段施工、监测数据采集、工艺参数调试，协助建立施工质量全过程管控体系，保障处治工程施工质量、安全与进度，同步收集现场反馈数据用于技术优化。

（4）行业标准与技术推广支撑

依托公司在交通行业标准编制、技术推广方面的经验，协助项目团队完成技术指南、施工工法等成果编制与申报，推动研究成果纳入陕西省交通建设相关技术标准体系，并在省内后续交通工程中开展示范推广。

（5）产学研协同与资源统筹

联动陕西交控集团全产业链资源，协调设计、施工、检测、养护等多方单位，搭建“科研—设计—施工—运维”一体化协同平台，保障项目研究与工程建设、运营养护全周期衔接，提升成果应用覆盖面与长效性。

（6）项目管理与经费配套保障

参与项目日常管理、进度统筹与跨单位协同工作，按要求落实配套科研经费与现场保障条件，协助完成项目中期检查、验收评审、成果归档等管理工作，确保项目按计划高质量完成。

项目参加单位二：山西省交通科学研究院集团有限公司

核心技术研发与攻关：充分发挥其在采空区治理领域的深厚积累，主导全固废注浆材料的配方优化、性能提升与产业化制备技术研究。负责新型注浆材料的室内配比试验、力学性能测试及耐久性评价。

灾变机理与模拟分析：主导浅伏厚基岩采空区沉陷机理、活化规律及治理优化理论研究。利用其先进的“黄土地地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室”及国家超算中心资源，负责开展大规模数值模拟分析（如FLAC3D、UDEC等），研究不同治理方案的力学响应，为优化设计提供理论依据。

室内模型试验：负责设计并实施几何相似比物理模型试验，模拟房柱式采空区从开挖、失稳到注浆处治的全过程，直观揭示灾变机制并验证处治效果。

技术标准与工法编制：凭借主编行业标准的经验，牵头负责《公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南》及相关施工工法的研究与起草工作。

项目参加单位三：陕西省交通规划设计研究院有限公司

精细化勘察技术集成与应用：主导“空天地”一体化综合探测技术的集成与应用方案研究。结合其工程勘察综合甲级资质和遥感技术应用经验，负责InSAR、LiDAR、OCTEM等多源数据的解译、融合与综合分析，精准划定采空区边界和危险区域。

处治方案优化设计与验证：基于数值模拟与理论研究成果，主导采空区治理宽度参数的工程化优化设计。负责将优化的岩层移动角、处治范围等研究成果转化为具体的施工图设计变更方案，并进行安全性与经济性复核。

工程效果评价体系构建：利用其在工程检测与评估方面的经验，

参与构建采空区处治效果综合评价体系,研究并提出包括钻孔取芯、物探检测、变形监测在内的多维度验收与评价方法。

协同工作机制:三家单位将通过建立定期技术协调会、数据共享平台和联合现场工作组等形式,确保理论研究、技术研发、设计优化与工程实施紧密互动,形成“研-设-建”一体化的协同创新闭环,共同保障项目目标的实现。

4.4 项目主要负责人情况

项目总负责人薛保勇,正高级工程师,陕西大锦高速公路有限公司董事长。薛保勇高工长期工作在工程建设第一线,具有多年高速公路建设项目管理经验,理论基础和项目管理经验丰富,曾参与多项科研项目。薛保勇高工作为工程建设项目的负责人,又作为科研项目的负责人,为完成本课题提供了坚实的支撑条件。

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

大柳塔至锦界高速公路暨包茂联络线既是神米高速(S11)的北延伸段,也是府神高速(S10)的西段。项目的建设,将完善榆林市高速公路网规划布局,有利于带动神木市资源的开发利用。同时,对加强省际间联系、促进省际间合作、推动晋陕蒙三省区交通一体化发展具有重要意义。大柳塔至锦界高速公路位于神木市境内,基本为南北走向。

起点位于神木市大柳塔镇朱盖沟,向西南经过柳树峁村、黄特老海后,下穿包西铁路,路线向南折经过纳林采当、神木西站、补花兔、瑶镇、止于锦界镇枣稍沟,与神米高速顺接。路线全长 63.592km(包含 1.6km 连接线)。包茂联络线均位于神木市境内,呈东西走向。

起于锦界镇活力海兔村,与大锦高速交叉设纳林采当枢纽,之后路线转向西北,与 S205 中锦公路交叉设尔林兔互通,在西葫芦素村跨越有理河和 G210 后,下穿规划的延榆鄂高铁,于包茂高速红碱淖收费站北 2 公里设葫芦素枢纽接包茂高速,路线全长 25.63km。

拟建高速公路 K0+923 ~ K4+430 段穿越锃源煤矿,根据勘察成果, K2+913 ~ K2+985 下部存在私采小煤窑采空区,线路以路基形式通过; 拟建高速公路 K10+774 ~ K11+272 段经过乾安煤矿,根据勘察成果, 其中 K10+835 ~ K12+000 下部存在小煤窑采空区,采空区内主要构造物有主线路基、孙家岔互通式立交(含匝道)、K0+739.594 被交线柳袁路上跨主线分离式立交桥、柳袁路改路等。

主线桩号 K10+835 ~ K12+000,为乾安煤矿 1-2 上煤层采空区域。西南侧的实际开采区域已经超过矿权边界。开采方式为平硐房柱式炮采,顶板基本无支护,回采率约 50%。开采的 1-2 上煤层厚度 2.2 ~ 3.8m,平均开采厚度约 2.5m,水平状。顶板为灰白色砂岩,属软弱覆岩。底板为深灰色砂质泥岩、泥质砂岩,采空区无充填,局部有积水。采空区底板标高+1120 ~ +1132m,埋深 23.6 ~ 66.7m,空洞高度 1.5 ~ 3.8m,采深采厚比 6.9 ~ 26.4,属于浅层采空区。停采时间超过 7 年,属于老采空区,地面变形不明显,目前剩余空隙率约 75%。

针对拟建道路工程性质及下伏采空区的状况,综合考虑社会影响、工程造价、施工工期以及施工工艺等方面因素,本着“一次根治,不留后患”的设计原则,对采空区进行专项治理。拟对锃源煤矿小煤矿采空区、乾安煤矿采空区采用注浆充填法进行治疗,注浆充填法是在地表钻孔,通过注浆泵、注浆管,将具有充填、胶结性能的浆液注入采空区冒落带及裂隙带中,浆液经过固化,充填采空区冒落带并胶结岩层裂隙带,使浆液结石体对其上覆岩层形成支撑作用,保证路基的

稳定。

5.2 投资来源

项目公司自筹 100 万元，陕西省交通运输厅补助 19.8 万元。

5.3 工程进度与项目科研进度的配合

为确保项目科研进度与工程实施进度相匹配，科研成果能直接服务于工程建设，实现“科研引领设计、设计指导施工、施工反馈科研”的良性互动，本项目将建立“阶段同步、节点嵌入、动态调整”的深度协同机制，使科研活动与实体工程进度紧密耦合、一体推进。具体配合方案如下：

（1）总体协同原则

前置研究，指导设计：关键科研课题（如精细化探测、治理宽度优化、材料基本配比）在相应工程设计阶段开始前即启动，其初步结论直接作为优化设计方案的科学依据。

并行验证，动态优化：现场施工阶段是最大的“实验室”。科研活动（尤其是现场试验）与工程施工同步进行，利用工程载体验证和修正技术参数，形成“研究-应用-反馈-再优化”的快速迭代。

成果固化，即时转化：经现场验证成熟的科研成果，将以设计变更、工艺工法、作业指导书等形式迅速固化，并应用于后续标段或工序，确保科研效益即时转化为工程效益。

（2）分阶段具体配合方案

工程建设阶段	对应的核心科研活动	具体匹配方式和科研成果	负责单位协同
第一阶段: 施工图设计 优化期(1-5 个月)	1. “空天地”一体化探测数据深度解译。 2.采空区治理宽度理论分析与初步数值模拟。 3.全固废注浆材料室内初选配比确定	科研输入设计: 将融合探测成果形成的《采空区精细化分布图与风险分区图》提交设计单位, 作为设计基础。 优化方案提出: 基于初步模拟, 提出治理宽度优化建议方案(如建议采用82°移动角), 并与设计方共同完成《采空区处治优化设计方案论证报告》。 材料标准确定: 提供初步满足规范要求材料配比范围, 供设计概算参考。	大锦公司(组织协调) 陕西设计院(主导设计优化) 山西交科(主导模拟与材料研究)
第二阶段: 试验段施工 与全面处治 前期(6-7个 月)	1.现场试验段实施(精准探测、优化参数处治)。 2.材料配比现场中试与工艺验证。	“科研试验段”先行: 在工程首个开工的采空区工区, 划定200-300米作为科研试验段, 同步布设密集型监测网络。 工艺参数定型: 根据试验段施工监测数据, 优化并最终确定注浆材料施工配比、浆液扩散半径、注浆压力等关键工艺参数, 形成《标准化作业指导书》。	大锦公司(组织施工、提供场地与监测条件) 山西交科(负责试验方案、模型试验与数据分析) 陕西设计院(负责试验段专项设计、效果检测)
第三阶段: 全线处治施 工高峰期 (8-10个月)	1.科研成果全面推广与应用。 2.施工过程质量监控与快速检测技术应用。 3.长期性能观测系统建设	技术全面铺开: 将试验段验证成功的优化治理范围、新材料、新工艺编制成《大锦高速采空区处治专项施工技术指导书》, 用于指导全线施工。 嵌入施工流程: 科研人员驻场, 将快速检测方法(如简易波速测试)嵌入施工工序验收环节, 实现质量实时控制。 布设长期观测网: 结合	大锦公司(主导全线施工管理) 陕西设计院、山西交科(提供持续技术支持、处理施工中发现的新问题)

工程建设阶段	对应的核心科研活动	具体匹配方式和科研成果	负责单位协同
		工程永久监测需求，布设 InSAR 角反射器、自动化 GNSS 监测点等，建立科研与养护共用的长期稳定性监测系统。	
第四阶段： 工程收尾与运营养护期 (11 个月以后)	1.物理模型试验与深化数值模拟。 2.处治效果综合评价。 3.长期数据积累与分析。 4.成果总结与标准提炼。	验证与修正理论模型：利用试验段开挖前后数据，验证并修正数值模型，并开展室内物理模型试验，进一步揭示浅伏厚基岩房柱式采空区灾变机理并对处治对策提出建议。 最终效果评估：工程交工前，采用钻孔取芯、孔内电视、综合物探等方法，形成《采空区处治效果综合评价报告》，作为工程验收的科研依据。 持续数据反馈：运营初期（1-3 年）的监测数据将持续反馈至科研团队，用于验证长期性能，完善“活化”预警模型。 成果固化输出：项目研究总报告、技术指南、工法、专利等最终成果在此阶段完成，并为行业标准修订提供案例支撑。	三家单位共同（联合完成总结与评价）

(3) 组织与制度保障

联合工作组机制：成立由业主、设计、科研、施工四方参与的项目联合工作组，每月召开例会，协调解决科研与工程界面问题。

进度联动计划：编制详细的《科研与工程联动进度横道图》，明确每一项科研任务的关键节点、交付成果及其对应的工程节点，纳入整体项目管理。

数据共享平台：建立统一的项目数据管理平台，实时共享勘察、

设计、施工、监测和实验数据，确保科研分析基于最新、最真实的工程信息。

通过以上安排，本项目将彻底打破科研与工程“两张皮”的传统模式，使科研进程成为驱动工程提质、降本、增效的核心引擎，确保每一项科研投入都能在工程实践中找到落脚点并产生实际价值。

5.4 组织管理形式

为确保本项目高效、有序实施，实现科研目标与工程目标的有机统一，特建立“领导小组统筹、专项小组实施、联合办公室协调、专家顾问指导”的四级矩阵式组织管理体系，明确权责，规范流程，保障项目在技术、进度、质量和经费方面得到全面管控。

5.4.1 组织结构与职责

本项目成立由承担单位与各参加单位共同组成的项目组织管理机构，具体结构及职责如下：

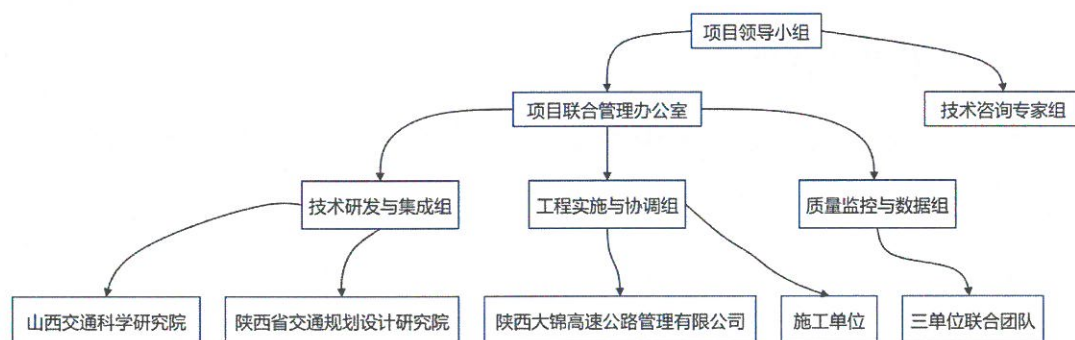


图 5.1 组织结构图

(1) 项目领导小组

构成：由承担单位（陕西大锦）主要领导、各参加单位（山西交科、陕西设计院）项目负责人共同组成，设组长 1 名（由承担单位领导担任），副组长若干。

职责：是项目的最高决策机构。负责审定总体实施方案、研究计划与重大技术路线；协调解决跨单位的重要资源和政策问题；批准重

大经费调整与最终成果；对项目整体绩效负责。

（2）项目管理联合办公室

构成：由各参与单位派驻的专职管理人员和技术联络人组成，办公室常设在承担单位（陕西大锦）项目部。

职责：是项目日常管理与协调的中枢。负责编制详细的进度计划并跟踪监督；组织各类会议与交流活动；管理项目经费的划拨与使用监督；负责知识产权的统一管理与文档归档；处理日常行政与后勤保障事务。

（3）技术咨询专家组

构成：聘请 3-5 名国内外在采空区治理、岩土工程、道路材料及遥感技术领域的知名专家组成。

职责：对项目关键技术路线、重大试验方案、创新性结论提供独立咨询与评审；参与项目中期检查与最终成果鉴定，确保研究的先进性与可靠性。

（4）专项实施组

技术研发与集成组：由山西交科和陕西设计院的技术骨干为核心构成。下设“机理与材料研究”、“探测与设计优化”、“工艺与装备”等小组，分别负责对应科研内容的攻关、模拟分析与技术集成。

工程实施与协调组：由陕西大锦公司项目管理人员及施工单位负责人组成。负责科研试验段及全线推广的现场组织实施、安全监管、进度控制以及与施工、监理等参建各方的外部协调。

质量监控与数据组：由三家单位共同派出人员组成。负责制定统一的观测、检测与数据采集标准；管理“项目数据共享平台”；对现场试验、材料性能、处治效果进行独立的质量复核与数据分析。

5.4.2 运行与管理机制

（1）决策与汇报机制

实行“月度例会、季度检查、年度总结”的定期会议制度。月度例会由联合办公室召集，各实施组汇报进展，协调问题；季度检查邀请领导小组成员参加，审查关键节点成果；年度总结向领导小组及专家组全面汇报。

建立分级决策流程：常规技术问题由专项组协商解决；涉及方案变更或预算调整由联合办公室审核后报领导小组审批；重大技术方向问题需征求专家组意见。

（2）沟通与协同机制

信息共享平台：依托云端建立项目专属协作平台，实时共享实验数据、设计图纸、模拟报告、会议纪要和进度报表，确保所有参与方信息同步。

人员互派与驻场：科研单位（山西交科、陕西设计院）派遣技术人员长期驻守工程现场，深度参与施工过程；工程单位（陕西大锦）指派人员参与关键试验与数据分析，促进研用双向理解。

（3）风险管理机制

联合办公室负责定期识别技术风险（如试验失败、参数不达预期）、管理风险（如进度滞后、沟通不畅）和工程风险（如施工遇复杂地质），并制定应急预案。

设立技术难题“快速响应通道”，对现场突发技术问题，由相关专项组在24小时内组织会商，提出解决方案。

（4）成果与知识资产管理

所有项目产生的数据、报告、图纸、软件、专利、论文等成果，均由项目管理联合办公室统一登记、归档和发布。知识产权归属及收益分配方案在项目启动前以协议形式明确。

建立规范的文档管理体系,确保从实验记录到最终报告的全过程可追溯。

5.4.3 与工程建设管理体系的融合

本项目组织管理体系将深度嵌入“大锦高速公路“总体工程建设管理体系之中:

管理界面融合:项目领导小组与大锦高速项目指挥部建立联席会制度,确保科研重大决策与工程建设总目标一致。

计划管理融合:项目科研进度计划(详见5.3节)纳入工程总体施工网络计划,作为关键节点进行同步考核。

资源保障融合:项目的现场试验、监测布点等所需设备、场地、人员等资源,由工程实施与协调组统一向项目部申请调配,纳入工程资源整体计划。

通过上述组织管理形式,本项目将构建一个权责清晰、沟通顺畅、反应迅速、监管有力的运行框架,为科研成果的高质量产出及其在重大工程中的成功转化应用提供坚实的制度保障。

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	119.8	19.8	100
工程配套研究经费	100	（一）直接费用	114.8	19.8	95
单位自筹		1.设备费	17.8	5	12.8
其他经费		（1）购置设备费	0		0
		（2）试制设备费	15	5	10
		（3）设备改造与租赁 费	2.8		2.8
		2.材料费	30	10	20
		3.测试化验实验加工费	3		3
		4.燃料动力费	1		1
		5.会议费/差旅费/国际 合作与交流费	10		10
		6.出版/文献/信息传播/ 知识产权事务/印刷费	15		15
		7.劳务费	30	4.8	25.2
		8.专家咨询费	8		8
		9.其他支出	0		0
		（二）间接费用	5		5
		1.管理费	3		3
		2.绩效支出	2		2

注：预算编制按照《中共中央办公厅 国务院办公厅关于进一步完善中央财政科研项目资金管理等政策的若干意见》（中办发〔2016〕50号）、《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）文件要求执行。

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) 授权发明专利	1-2
		(2) 实用新型	
		(3) 外观设计	
		2、软件著作权授权数(项)	
		3、发表论文(篇)	
		(1) 其中 SCI 索引收录数	
		(2) 其中 EI 索引收录数	
		(3) 其它	3-5
		4、著作(部)	
		5、制订标准数(项)	
		(1) 国际标准	
		(2) 国家标准	
		(3) 行业标准	
		(4) 地方标准	
		(5) 企业标准	
		(6) 科技报告	1
	其他成果	1、填补技术空白数	
		(1) 国际	
		(2) 国家	
		(3) 省级	1
		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)	1
		(2) 新产品(含农业新品种)	
		(3) 新材料	1
		(4) 新装备(装置)	
		(5) 平台/基地/示范点	
		(6) 中试线	
		(7) 生产线	

一级指标类别	二级指标类别	明细指标	指标值
产出类指标	其他成果	4、研究开发情况	
		(1) 小试	是/否
		(2) 中试（样品样机）	是/否
		(3) 小批量	是/否
		(4) 规模化生产	是/否
	人才引育	1、引进高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	
		2、培养高层次人才	
		(1) 博士、博士后	
		(2) 硕士	2
		3、培训从事技术创新服务人员（人次）	
		4、是否设立科研助理岗位	是/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）	1200 万
		2、新增销售（万元）	
		3、新增出口创汇（万美元）	
		4、新增利润（万元）	
	社会效益	1、新增税收（万元）	
		2、新增就业人数	
		3、就业培训（人次）	
		4、带动农民增收（万元）	
		5、培训和指导科技服务（人次）	
		6、新增产业带动情况	
		7、技术集成示范（项）	
		8、建立示范基地（亩数）	
		9、节约资源能源	
		10、环保效益	
其他需要说明的情况			

八、预期目标、成果提供形式及经济社会效益

8.1 预期目标

- (1) 分析并提出开采沉陷区动态预计模型及预测方法;
- (2) 分析并提出浅伏厚基岩采空区路基治理宽度及方案设计;
- (3) 研发采空区改性粉煤灰-风积沙灌注材料, 并提出灌注一体施工工艺和质量控制标准;
- (4) 建立采空区公路路基治理效果评价体系;
- (5) 形成公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南 1 项;

8.2 主要技术经济指标

- (1) InSAR 精细化探测精度不低于 5mm, OCTEM 技术反演采空区形状、大小、高度等精度不低于 1m。
- (2) 全固废改性粉煤灰-风积沙灌注材料强度 $\geq 1.5\text{MPa}$; 体系收缩比小于 5%。

8.3 经济和社会效益

(1) 经济效益分析

浅伏厚基岩采空区路基处治工程, 按照公路采空区处置技术细则, 岩层移动角为 70° , 根据研究成果可将移动角度增加到 $80^\circ\sim 90^\circ$ 之间, 通过少处置、少钻孔、少注浆的模式, 大面积降低处置费用, 考虑到后期的运营的安全与稳定, 综合处置费用降低不少于 20%。

(2) 社会和生态效益分析

本研究提出的改性粉煤灰-风积沙灌注材料, 原材料是工业固废, 降低了二氧化碳排放, 是低能绿色产品。同时, 其综合成本相对于传统水泥粉煤灰灌注材料, 根据使用规模成本又有望降低 20%。另外,

改性粉煤灰-风积沙灌注材料不仅无毒无害，对环境无不良影响，而且应用范围广，耐腐蚀性强。改性粉煤灰-风积沙灌注材料的研发不仅能够提高灌注材料的使用寿命，同时可减少处治理费用。项目的实施不仅有利于促进和带动我省采空区处治相关产业的可持续发展，而且通过制定相关行业标准，实现在交通运输工程领域的综合利用工业级示范，对于行业的发展具有重大的意义。

另外，通过本项目的实施，将有利于培养道路行业绿色可持续发展相关的研发专业人才和产业化技术骨干队伍，为新世纪进行人才储备，因此既能为我国尤其是我省高新技术的产业化提供高端人才，也能有效的缓解社会就业压力。

8.4 成果提供形式

- (1) 形成重载浅伏厚基岩采空区处治创新型成果；
- (2) 解决小窑采空区成套处治技术难题；
- (3) 减低工程造价、缩短工程周期、提升项目品质；
- (4) 培养一批复杂地质条件下采空区处治技术人才；
- (5) 形成采空区处治技术方案、工程实施指南 1 项；
- (6) 发表论文核心及以上论文 3~5 篇，申请发明专利 3~5 项；
- (7) 提交项目研究报告 1 项。

九、其它需要说明的问题

无。

十、申请单位意见

以上申报内容均真实可靠，依托工程大柳塔至锦界高速公路施工图设计已批复，配套经费已落实。



单位负责人：（签字）

韩学勇

年 月 日

重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治 关键技术研究大纲评审意见

2026年3月11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“重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术研究”（项目编号：25-70K）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、项目研究人员组成比较合理，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、预期成果完全覆盖研究目标，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.提交采空区处治技术方案、工程实施指南；
- 2.研究内容补充长周期监测和应用效果评估。

主任委员：



2026年3月11日

专家审查意见表

项目名称	重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术研究				
专家姓名	边世斌	职务/职称	正高工	专 业	交通土建
专家单位	陕西交通技术咨询有限公司			联系电话	13709187350

评 审 意 见

1. 采空区作为地质灾害的高发区域,其地质稳定性问题对高速公路的安全运营构成了巨大威胁。因此,针对重载高速公路穿越采空区的灾变响应及精准处治关键技术研究,具有重要的理论价值和实际应用意义。

2. 研究内容应包含采空区地质特征与灾变机理分析、灾变响应监测与预警系统研发、精准处治技术、效果评估。

3. 应对目标采空区进行详细的现场勘查,获取地质结构、岩性特征等第一手资料。利用数值模拟软件对采空区的应力分布和变形特征进行模拟分析,结合理论分析揭示灾变机理。研发灾变响应监测与预警系统,进行实地测试与优化。在工程实例中实施精准处治技术,并进行长期效果评估。

4. 提交采空区处治技术方案、工程实施指南。

评审专家(签字):



2026年3月11日

专家审查意见表

项目名称	重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术				
专家姓名	封捍东	职务/职称	正高级工程师	专 业	桥梁工程
专家单位	陕西交控科技集团			联系电话	13991816558

评 审 意 见

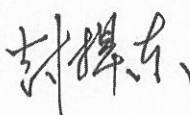
一、项目研究目标明确，内容比较全面，技术路线可行。

二、项目研究人员组成比较合理，前期研究基础扎实，试验设备齐全，依托工程落实，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高度契合。

建议：

加强处置后的长期变形观测，科学检验研究成果。

评审专家（签字）：

2026 年 3 月 9 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	重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术 (项目编号: XHZB-25-098)				
专家姓名	师延强	职务/职称	正高工	专 业	道路与桥梁
专家单位	铜川市交通运输综合执法支队			联系电话	13309195936

评 审 意 见

(一) 采空区精细化物理探测及残余变形特征研究

1. 优势与亮点

数据处理方法先进: 引入卷积 - 双向长短时记忆网络 (CNN-BiLSTM) 对物探数据进行深度学习反演, 结合新的网格剖分方法实现三维有限元快速精确计算, 提升了采空区空间位置、边界形态的识别精度, 数据处理的智能化水平领先。

残余变形预测模型科学: 融合改进 Knothe 时间函数与概率积分法, 将 InSAR 时序形变数据作为边界条件与校正参数, 构建能反映老采空区“活化”特征的动态预测模型, 实现沉陷区边界与危险区域的精准划分, 为后续处治设计提供了可靠依据。

2. 优化建议

(1) 补充多源探测数据的融合权重研究: 不同探测技术 (InSAR、OCTEM、钻探) 在精度、覆盖范围、成本上各有优劣, 建议建立基于熵权法或层次分析法的多源数据融合权重模型, 明确不同工况下各探测数据的权重占比, 进一步提升综合探测的可靠性。

(2) 强化微小采空区与裂隙带的识别能力: 针对私采小煤窑采空区规模小、分布零散的特点, 建议优化 OCTEM 探测的分辨率参数, 增加高密度电阻率法与钻孔摄像技术的联合应用, 提升对埋深较浅、空洞高度 $< 1\text{m}$ 的微小采空区及采动裂隙带的识别精度。

(3) 完善残余变形的长期监测方案: 现有监测主要聚焦施工期与运营初期, 建议补充运营期长期监测的技术方案, 明确监测点布设密度、数据采集频率及预警阈值, 建立残余变形的长期演化数据库, 为采空区“活化”风险研判提供长期数据支撑。

(二) 浅伏厚基岩采空区治理宽度参数优化及稳定性评价

1. 优势与亮点

治理宽度优化针对性强: 针对浅伏厚基岩房柱式采空区的地质特点, 通过理论分析、室内物理模拟与数值模拟相结合的方法, 探究 70° 、 82° 、 85° 、 88° 四种岩层移动角工况下的治理范围, 提出小

于开采移动角的精细化处治宽度，既保障路基安全稳定，又有效节约工程成本，优化思路务实。

稳定性评价体系全面：考虑全充填、墩台式充填、条带式充填等多种加固方式，结合依托工程开展试验段验证，从应力场、位移场、安全系数等多维度评价路基结构稳定性，评价指标量化、评价方法科学，能全面反映处治效果。

2. 优化建议

(1) 补充不同采空区参数的敏感性分析：建议系统研究采空区埋深、剩余空隙率、覆岩岩性等关键参数对治理宽度的影响规律，明确各参数的敏感性排序，形成不同参数组合下的治理宽度查询表，提升优化方案的普适性。

(2) 强化浆液结石体的强化效应研究：现有优化未充分考虑注浆后结石体对覆岩稳定性的强化作用，建议通过数值模拟与现场试验，量化结石体的刚度、强度对岩层移动角的影响，进一步优化治理宽度计算公式，提高处治方案的经济性。

(三) 采空区重载路基动力特性试验研究

1. 优势与亮点

研究场景贴合重载交通特点：聚焦循环荷载作用下采空区带状充填路基的动力响应，考虑汽车荷载大小、频率及采空区埋藏深度、处治宽度等关键影响因素，研究内容紧扣重载高速公路的运营需求，针对性极强。

研究方法综合全面：采用数值模拟、物理相似模拟及现场试验相结合的方法，构建“路基 - 处治体 - 采空区覆岩”耦合模型，分析重载交通与地下水耦合作用下的长期动力稳定性，研究手段系统，能有效揭示动力灾变机制。

2. 优化建议

(1) 强化不同充填方式的动力响应对比：现有研究涵盖多种充填方式，但未明确不同充填方式在动力稳定性上的优劣，建议增加不同充填方式的动力特性对比试验，量化分析其在抗疲劳、抗变形方面的差异，为充填方式选型提供量化依据。

(2) 完善动力灾变的预警指标体系：建议基于动力响应试验结果，提取路基沉降速率、加速度峰值、充填体应力突变等关键预警指标，明确各指标的预警阈值与分级标准，为运营期动力灾变预警提供技术支撑。

(四) 全固废注浆材料研发及灌注一体工程应用

1. 优势与亮点

材料研发绿色低碳：以大锦高速沿线丰富的粉煤灰、风积砂、煤矸石等固废为原料，研发全固废注

浆材料，固废掺量 $\geq 70\%$ ，既降低了材料成本，又实现了固废资源化利用，契合绿色交通发展理念。

材料性能与工程需求匹配度高：针对注浆孔与帷幕孔的不同技术要求，分别优化浆液配比，明确注浆孔浆液流动度 $\leq 30s$ 、帷幕孔浆液塌落度 $\geq 220mm$ 等关键指标，结石体 7d 抗压强度满足路基与桥隧下伏采空区的差异化需求，性能设计精准。

施工工艺与质量控制完善：研发灌注一体施工工艺，建立充填过程实时监测与控制系统，重点关注浆液扩散均匀性、充填率等关键参数，结合钻孔取芯、波速测试、孔内电视等手段构建处治效果综合评价体系，施工与质量控制的闭环管理到位。

2. 优化建议

(1) 完善灌注工艺的智能化控制：建议增加注浆压力、浆液流量的实时反馈调节系统，基于 CNN-BiLSTM 算法构建浆液扩散预测模型，实现注浆参数的动态优化，提升浆液充填的均匀性与密实度，减少充填缺陷。

(五) 其他建议

1. 补充不同采空区类型的差异化处治技术：现有研究主要聚焦浅伏厚基岩房柱式采空区，建议增加对无充填采空区、积水采空区、多层采空区等不同类型的采空区的差异化处治技术研究，明确各类型采空区的最优充填方式、材料配比及治理宽度，提升成果的普适性。

2. 完善全生命周期成本分析：现有成本优化主要关注施工期直接成本，建议补充全生命周期成本分析模型，涵盖材料生产、施工、运营期养护、残值回收等全流程成本，量化不同处治方案的长期经济效益，为工程决策提供更全面的成本依据。

评审专家（签字）：

师延强

年 月 日

专家审查意见表

项目名称	重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术研究				
专家姓名	牛开民	职务/职称	研究员	专 业	道路工程
专家单位	交通运输部公路科学研究院			联系电话	13701028353

评 审 意 见

△研究内容全面, 研究思路明确, 技术路线可

行

△前期研究基础扎实,

△建议:

·注重研究应用成果的总结提升, 争取提出
 一些共性关键技术, 为修訂行业标准
 提供支撑。

评审专家(签字):

2026 年 3 月 11 日

专家审查意见表（25-70K）

项目名称	重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术				
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

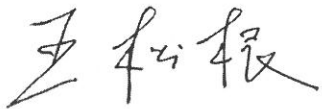
本项目引入等值反磁通瞬变电磁法（OCTEM）与InSAR技术融合的采空区综合勘探技术、提出改性粉煤灰/风积砂/煤矸石全固废类采空区注浆充填材料的制备方法及灌注一体施工工艺、质量控制标准、提出浅伏厚基岩采空区治理合理宽度并给定其及稳定性评价计算方法。具有一定的现实意义和创新性。

提交的研究大纲，内容全面、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：

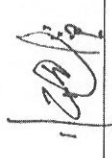
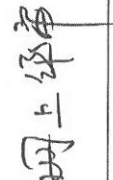
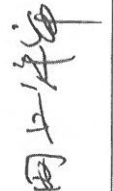
1. 采空区识别除采用等值反磁通瞬变电磁法（OCTEM）与InSAR技术融合的现代勘探技术外，还应与传统的调研、现场调查和现场勘探（包括钻探）等方法相结合。
2. 采空区处治应本着营因地制宜、分别处治的原则，注浆法、干砌支撑法、开挖回填法、强夯法、巷道加固法和跨越法等多项技术可组合应用。当采用注浆法时，可引入靶向注浆的技术，避免盲目的一灌了之的简单处治方法。
3. 应强化题目中采空区灾变响应的研究内容。根据地面沉降、地裂缝和地面塌陷的数据采集和处理结果，增加灾变响应及时性和相应技术支撑的要求。

评审专家（签字）：

2026 年 03 月 11 日

重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术研究 (项目编号: 25-70K)

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	边世斌	陕西交通技术咨询有限公司	道路工程	交通土建	正高工	
2	委员	封捍东	陕西省公路学会	桥梁工程	公路工程质量 管理	正高工	
3	委员	师延强	铜川市交通运输 综合执法支队	道路与桥 梁工程	交通运输工程	正高工	
4	委员	牛开民	交通运输部公路 科学研究院	道路工程	道路工程	教授	
5	委员	王松根	山东省公路局	公路工程	道路工程	正高工	

专家意见处理表

项目名称：重载高速公路穿越采空区灾变响应及精准处治关键技术 （项目编号：25-70K）

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	边世斌	1.研究内容应包含采空区地质特征与灾变机理分析、灾变响应监测与预警系统研发、精准处治技术、效果评估。 2.应对目标采空区进行详细的现场勘查, 获取地质结构、岩性特征等第一手资料。利用数值模拟软件对采空区的应力分布和变形特征进行模拟分析, 结合理论分析揭示灾变机理。研发灾变响应监测与预警系统, 进行实地测试与优化。在工程实例中实施精准处治技术, 并进行长期效果评估。 3.提交采空区处治技术方案、工程实施指南。	1. 已修改。在 3.2 中亚牛内容一中补充细化了采空区地质特征与灾变机理分析、灾变响应监测相关内容; 研究内容二中细化了精准处治技术、效果评估。 2. 已修改。在 3.2 节研究内容一中完善了精细化勘察相关内容, 通过结合星载 InSAR 技术、机载 LiDAR 技术、地表 GNSS 监测、高精度瞬变电磁法以及钻探等技术进一步查明采空区形态特征、采空区状态和相关要素。 3. 已修改。在 8.1 预期成果中, 补充了采空区处治技术方案和公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南。
2	封捍东	1. 加强处置后的长期变形观测, 科学检验研究成果。	1. 已修改。在 3.2 节研究内容一中包含了 InSAR 技术、GNSS 地表监测, 上述两种监测方式均覆盖了采空区处治前后长期变形监测。

3	师延强	1. 补充多源探测数据的融合权重研究; 2. 强化微小采空区与裂隙带的识别能力; 3. 完善残余变形的长期监测方案; 4. 补充不同采空区参数的敏感性分析; 5. 完善灌注工艺的智能控制; 6. 补充不同采空区类型的差异化处治技术; 7. 完善全生命周期成本分析。	1. 已修改。在 3.2 节研究内容一中补充了多源探测数据的融合权重相关内容。 2. 已修改。在 3.2 节研究内容一精细化探测, 钻探方法中通过孔内电视, 可实现微小采空区与裂隙带的识别能力研究。 3. 已修改。在 3.2 节研究内容一中包含了 InSAR 技术、GNSS 地表监测, 上述两种监测方式均覆盖了采空区处治前后长期变形监测。 4. 已修改。在 3.2 节研究内容五中注浆材料研发中补充了不同采空区参数的敏感性分析。 5. 已修改。在 3.2 节研究内容五中补充了注浆一体化灌注工艺的智能控制相关内容。 6. 已修改。在采空区处治设计方案比选中, 进行了采空区处治方法的对比分析和方案比选。 7. 已修改。在 3.2 节研究内容五灌注一体工程应用中研究内容中增加了全生命周期成本分析。
4	牛开民	1. 注重研究成果的总体提升, 提出一些共性关键技术, 为修订行业标准提供参考。	1. 已修改。重新梳理了研究成果内容。提出建立采空区公路路基治理效果评价体系; 形成公路工程房柱式采空区全固废注浆材料应用技术指南 1 项。可为修订行业标准提供参考。

5	王松根	1. 采空区识别除采用等值反磁通瞬变电磁法 (OCTEM) 与 InSAR 技术融合的现代勘探技术外, 还应与传统的调研、现场调查和现场勘探 (包括钻探) 等方法相结合。 2. 采空区处治应本着因地制宜、分别处治的原则, 注浆法、干砌支撑法、开挖回填法、强夯法、巷道加固法和跨越法等多项技术可组合应用。当采用注浆法时, 可引入靶向注浆的技术, 避免盲目的一灌了之的简单处治方法。 3. 应强化题目中采空区灾变响应的研究内容。根据地面沉降、地裂缝和地面塌陷的数据采集和处埋结果, 增加灾变响应及时性和相应技术支撑的要求。要体现如何与依托工程实施的结合。
---	-----	--

1. 已修改。在 3.2 节研究内容一中, 增加了传统的地质调查、现场调查和物探、钻探等方法。
2. 已修改。在采空区处治设计方案比选中, 进行了采空区处治方法的对比分析和方案比选。
3. 已修改。在 3.2 研究内容二中进行进一步补充细化了采空区灾变响应的研究内容。

项目负责人 (签字):