**科技成果登记表**

|  |  |
| --- | --- |
| 成果名称 | 钛石膏改性固化关键技术研究与路用示范 |
| 成果登记号 | 鲁交科评字[2025]第37号 | 知识产权 |  |
| 完成单位 |
| 序号 | 单位名称 | 通讯地址 |
| 1 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 山东省德州市陵城区（原德州市公路管理局路政管理支队院内） |
| 2 | 深圳大学 | 广东省深圳市南山区南海大道 3688 号 |
| 3 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 山东省济南市天桥区无影山西路576号 |
| 4 | 广东同创科鑫环保有限公司 | 广州市南沙区黄阁镇番中公路黄阁段23号联越半山广场A1栋3A02号 |
| 5 | 中交一公局集团有限公司 | 北京市朝阳区管庄周家井世通国际大厦A座 |
| 6 | 中交一公局海威工程建设有限公司 | 北京市通州区徐兴路568号1号楼 |
| 7 | 山东智行勘察设计院有限公司 | 山东省德州市晶华大道159号 |
| 8 | 山东智钧项目管理有限公司 | 山东省德州市晶华大道159号 |
| 9 | 济南裕兴化工有限责任公司 | 山东省济南市天桥区济南新材料产业园区裕兴路100号 |
| 10 | 德州德达环境检测有限公司 | 山东省德州市德城区天衢街道办事处格瑞德路2159号天衢工业园内金田创业中心综合楼4楼416室 |
| 11 | 山东省交通工程监理咨询有限公司 | 济南市历下区奥体中路5006号 |
| 完成人 |
| 序号 | 姓名 | 工作单位 | 对成果的贡献 |
| 1 | 刘 凯 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 项目总负责人 |
| 2 | 陈忠平 | 深圳大学 | 项目技术负责人 |
| 3 | 孟庆波 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 项目总体协调 |
| 4 | 于 坤 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路专业技术负责 |
| 5 | 陈锡麟 | 广东同创科鑫环保有限公司 | 材料技术开发 |
| 6 | 冯波宇 | 广东同创科鑫环保有限公司 | 材料试验 |
| 7 | 姬凤玲 | 深圳大学 | 钛石膏改性理论 |
| 8 | 朱国飞 | 深圳大学 | 钛石膏改性理论分析 |
| 9 | 陈鑫鑫 | 广东同创科鑫环保有限公司 | 材料试验 |
| 10 | 段圣涛 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 现场协调、质量管控 |
| 11 | 王永升 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 现场试验 |
| 12 | 尚仁新 | 山东智钧项目管理有限公司 | 质量管控 |
| 13 | 刘大鹏 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 机械调配 |
| 14 | 马金宝 | 德州德单高速公路建设有限公司 | 合同管理 |
| 15 | 刘 敏 | 深圳大学 | 数值模拟分析 |
| 16 | 陈善斌 | 广东同创科鑫环保有限公司 | 现场试验 |
| 17 | 王绍斌 | 山东省交通运输厅内河水运发展服务中心 | 技术指导 |
| 18 | 祖晓朋 | 中交一公局海威工程建设有限公司 | 现场施工 |
| 19 | 任玉涛 | 中交一公局海威工程建设有限公司 | 现场施工 |
| 20 | 曹栋 | 中交一公局海威工程建设有限公司 | 现场施工 |
| 21 | 李建东 | 中交一公局海威工程建设有限公司 | 现场施工 |
| 22 | 沈厚民 | 山东智行勘察设计院有限公司 | 道路设计 |
| 23 | 吴建东 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路设计 |
| 24 | 宋玉鑫 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路设计 |
| 25 | 孙玉海 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路设计 |
| 26 | 宋晓莉 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路设计 |
| 27 | 张冉 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路设计 |
| 28 | 王健 | 山东省交通规划设计院集团有限公司 | 道路设计 |
| 29 | 薛春丽 | 德州德达环境检测有限公司 | 环境监测 |
| 30 | 韩如意 | 广东同创科鑫环保有限公司 | 资料管理 |
| 31 | 郭海强 | 济南裕兴化工有限责任公司 | 质量管控 |
| 32 | 李永康 | 深圳大学 | 数值模拟 |
| 33 | 张海福 | 山东省交通工程监理咨询有限公司 | 试验数据整理 |
| 34 | 公衍明 | 山东省交通工程监理咨询有限公司 | 现场试验 |
| 35 | 彭楠楠 | 中交一公局集团有限公司 | 项目协调 |
| 36 | 乔天飞 | 中交一公局集团有限公司 | 现场施工 |
| 成果公报内容 |
| 一、核心技术与创新点1. 理论创新：提出“Fe³⁺-SO₄²⁻-Ca²⁺三元离子桥接模型”，突破钛石膏中胶态Fe(OH)₃包裹晶体阻碍水化反应的难题，实现高掺量（>60%）钛石膏固化。建立“含水率-强度-收缩”映射模型，精准控制膨胀率（<0.7%）和CBR值（>26.5%）。2. 材料创新：首创“石灰-粉煤灰-矿渣三元协同激发体系”，生成纳米级C-(A)-S-H凝胶与钙矾石交织网络，孔隙率降低60%，固化剂成本下降40%。3. 工艺创新：开发“现场撒布固化剂+快速混拌+连续碾压”一体化施工工法，解决初凝时间短（<180min）难题，单层30cm填料压实合格率达98%以上。二、成果先进性1. 性能先进：研发的专用固化剂可使钛石膏固化路基 7 天无侧限抗压强度达 2.5MPa 以上，28 天达 4.0MPa 以上，远超行业标准，显著提升承载能力。2. 耐久性先进：经干湿循环、冻融循环等耐久性试验验证，该技术处理的路基可承受 50 次以上干湿循环，强度损失率小于 15%；经受 30 次冻融循环后，质量损失率低于 5%，性能稳定。3. 环保与经济效益先进：减少堆放占地与环境污染，同时降低能耗与碳排放，节能减排效果显著。成本方面较传统路基方案成本降低 20%-30%，经济优势明显。三、关键性能指标

| 指标 | 改性前 | 改性后 | 规范要求 |
| --- | --- | --- | --- |
| 液限 | 67% | 45.9% | ≤50% |
| 易溶盐含量 | 3.886% | <0.2% | <0.3%（非盐渍土） |
| 膨胀率 | 60% | 0.44% | <0.7% |
| CBR值 | <8% | ≥26.5% | ≥8% |
| 无侧限抗压强度 | <100kPa | 28天≥4.0MPa | — |
| 水稳定性 | 浸水崩解 | 软化系数>0.59 | 长期稳定 |

四、应用效益1. 经济效益材料成本35–50元/吨，较传统碎石（80–120元/吨）降低50%–60%；双向四车道高速每公里节约造价1200–2700万元；养护成本下降15%–20%。1. 环境效益

每公里消纳钛石膏5–8万吨，全国推广10%年消纳量达3000–5000万吨；固化重金属（砷、铅等含量远低于国标）；每吨材料碳减排0.3–0.4 tCO₂，运输减排30%–50%。1. 工程效益

工期缩短20%，压实度>98%，弯沉值满足高等级公路要求。五、推广应用适用领域：公路底基层、软弱路基加固、市政道路及矿区修复。示范工程：山东德郓高速德州至高唐段（双向四车道）。推广前景：契合“双碳”目标及“无废城市”政策，已形成国家标准1项、企业标准2项、专利2项。六、改进方向1. 开展寒区/盐渍土区长周期（>10年）服役验证；2. 研发钛石膏专用摊铺设备。 |
| 评价专家名单 |
| 序号 | 姓名 | 单位 | 专业领域 | 职称 |
| 1 | 陈湘生 | 极端环境岩土与隧道工程智能建养全国重点实验室 | 岩土工程 | 教授 |
| 2 | 杨永顺 | 山东公路学会 | 道路工程 | 研究员 |
| 3 | 李振江 | 中国公路学会 | 道路工程 | 研究员 |
| 4 | 曹洪亮 | 山东高速齐临公路有限公司 | 道路工程 | 研究员 |
| 5 | 张宏博 | 山东大学 | 道路工程 | 教授 |
| 6 | 夏建平 | 山东高速基础设施建设有限公司 | 道路工程 | 高工 |
| 7 | 滕玉庆 | 山东省济南生态环境监测中心 | 环境工程 | 教高 |
| 组织评价单位：山东公路学会  |
| 评价意见 |
| 2025年6月21日，山东公路学会在济南组织了“钛石膏改性固化关键技术研究与路用示范”研究成果评价工作。评价委员会(名单附后)听取了项目组的汇报，审阅了相关技术文件，经质询和讨论，形成评价意见如下:1. 项目组提交的技术文件齐全，内容完整，数据可信，符合评价要求。
2. 项目组通过多学科(材料科学、环境工程、岩土力学等)交叉研究手段，开展了钛石膏路用改性机理、固化剂多元协同体系、施工工艺等方面的系统研究，取得了如下主要创新成果:

1.揭示了石灰/粉煤灰/矿渣活性组分破除胶态Fe(0H)3包裹、促进钙矾石定向生长的微观机理，提出了“Fe3+-S042---Ca2+三元离子桥接模型”，为高掺量钛石膏固化利用提供了理论支撑。2.研发了钛石膏路用改性固化剂,解决了钛石音高易溶盐、高含水率等技术难题重金属浸出浓度满足GB/T 30760限值要求。3.形成了钛石膏固化利用于公路路基的一体化施工工艺三、项目编制了相关企业标准，研究成果已在山东德郓高速公路路基工程中成功应用，经济、社会、环保效益显著。综上所述，项目研究成果总体上达到国际先进水平，其中路用改性固化技术达到国际领先水平。建议进一步加强推广应用。 |