

前 言

农村公路是覆盖范围最广、服务人口最多、公益性最强的交通基础设施，是农村地区最主要甚至是唯一的交通方式，对于服务农民出行、增进民生福祉、改善人居环境、促进农业农村现代化具有重要作用。截至 2024 年底，我国农村公路网络总里程已突破 464 万公里，基本形成了“外通内联、通村畅乡、客车到村、安全便捷”的农村交通运输网络，农民群众获得感、幸福感、安全感不断增强，农村公路成为老百姓家门口的致富路、幸福路、连心路、振兴路。

农村公路建好是基础，护好是保障，为巩固好来之不易的建设成果，保障农村公路持续发挥良好功能，必须强化养护管理，创新养护生产模式，在农村公路领域积极推广应用新技术、新工艺、新材料、新设备，有效延长农村公路使用寿命。为提升农村公路养护质量和效益，交通运输部征集了 46 个适用于农村公路养护的典型技术案例，具有较强的代表性、实用性，并按照简易操作类、经济实用类、创新探索类进行了分类，供各地在工作中参考借鉴。

目 录

第一篇 简易操作类

超早强修复混凝土在农村公路养护中的应用	
.....	北京市交通委员会通州公路分局 1
新型沥青路面网裂修复养护技术	
.....	河北省故城县交通运输局 6
沥青灌缝技术	
.....	河北省巨鹿县交通运输局 11
桥面伸缩缝处积水病害维修技术	
.....	上海市崇明区交通委员会 16
农村公路路面裂缝坑槽快速修复技术	
.....	安徽省濉溪县交通运输局 21
因地制宜破难题灌缝技术护公路	
.....	江西省万载县交通运输局 26
农村公路路面坑槽裂缝处置技术	
.....	山东省新泰市交通运输局 30
水泥毯在农村公路截水沟中的应用	
.....	湖北省远安县交通运输局 35
沥青砼路面裂缝经济型处置在农村公路养护中的应用	
.....	湖南省花垣县公路建设养护中心 38
水泥砼桥面（含伸缩缝）快速修复技术	
.....	广西壮族自治区大新县交通运输局 41
沥青冷补料工艺在经济型养护中的应用	
.....	四川省长宁县交通运输局 45
沥青路面坑槽冷补技术	
.....	贵州省黔南布依族苗族自治州交通建设养护发展中心 49
路面坑槽冷补修复工艺养护技术	
.....	新疆生产建设兵团第三师图木舒克市交通运输局 53

第二篇 经济实用类

二灰基层处理在农村公路养护工程中的应用	
.....	北京市交通委员会密云公路分局 59
基于高强度半柔性工法的农村公路耐久性提升路径	
.....	上海市金山区交通委员会 62
低等级公路“全再生”材料修复技术	
.....	上海市奉贤区交通委员会 66
渗固磨耗层在农村公路养护工程中的应用	
.....	江苏省常州市武进区交通运输局 71
全寿命周期低碳环保高韧超薄沥青磨耗层技术	
.....	江苏省海安市交通运输局 75
预应力碳纤维索加固桥梁技术	
.....	浙江省遂昌县交通运输发展中心 79
就地冷再生技术	
.....	山东省汶上县交通运输局 84
公路桥梁桩基冲刷处治技术	
.....	山东省昌乐县交通运输局 88
四阶递进式工艺：农村公路“白改黑”反射裂缝防治新技术	
.....	湖南省娄底市娄星区农村公路建设养护中心 93
拉杆格构梁法加固桥台技术	
.....	重庆市潼南区交通运输委员会 98
石拱桥高压灌浆及套箍封闭修复加固技术	
.....	重庆市涪陵区交通运输委员会 102
水泥混凝土路面病害“白改黑”修复技术	
.....	云南省鹤庆县交通运输局 107
水泥就地冷再生技术在农村公路养护中的应用	
.....	陕西省礼泉县公路管理站 113
水泥稳定类基层冷再生技术	
.....	甘肃省泾川县交通运输局 117

“冷再生+固化剂”基层技术

..... 甘肃省靖远县交通运输局 121

第三篇 创新探索类

ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面技术

..... 北京市交通委员会怀柔公路分局 125

MS3 型微表处技术在农村公路预防性养护中的应用

..... 河北省东光县交通运输局 130

立合剂：渗透型自愈裂缝修复材料

..... 山西省万荣县交通运输局 134

固化土技术在养护工程中的应用

..... 内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区交通运输局 139

交叉口 SST 超强韧沥青混合料车辙处理技术

..... 江苏省昆山市公路事业发展中心 143

SMF 自修复免维护伸缩缝灌缝技术

..... 江苏省昆山市公路事业发展中心 147

3D 变量铣刨技术

..... 浙江省丽水市交通运输局 152

DTO 高延弹超薄罩面技术

..... 浙江省丽水市莲都区公路管理中心 156

水泥路面微裂均质化再生处治技术

..... 浙江省宁海县交通运输局 160

旅游公路彩色陶瓷颗粒微表处技术应用

..... 山东省滕州市交通运输局 165

水泥路面微裂均质化现场再生技术应用

..... 河南省新县交通运输局 170

农村公路 AI 智能巡查及科学决策技术应用

..... 湖南省交通运输厅农村公路处 176

水泥混凝土路面全深式破碎冷再生技术
..... 湖南省长沙市望城区公路养护中心 180

反应型冷补料与贴缝带联合工艺沥青路面坑槽修复技术
..... 广西壮族自治区金秀瑶族自治县交通运输局 184

固化土路面技术
..... 四川省成都市双流区交通运输局 188

全过程数字化水泥路面微裂均质化薄层加铺技术
..... 陕西省留坝县交通运输局 193

砂砾路面“冷再生”技术
..... 青海省公路局 199

公路沥青路面冷再生技术
..... 新疆维吾尔自治区吉木萨尔县交通运输局 203

第一篇 简易操作类

超早强修复混凝土在农村公路养护中的应用

北京市交通委员会通州公路分局

一、适用场景

（一）超早强修复混凝土的性能优势

超早强修复混凝土是一种快凝型高强修补材料，其核心优势在于快速硬化和长效耐久的协同提升。

强度发展：通过硫铝酸盐水泥与纳米材料复合，实现 4 小时抗压强度 $\geq 30\text{MPa}$ ，养生周期较传统混凝土缩短 80%，大幅减少工程中断时间。

耐久性强化：低孔隙率设计使氯离子渗透系数降低至普通混凝土的 1/5 以下，抗冻融等级达 F300，延长修补部位使用寿命 50% 以上。

（二）工程应用与界面适配性

该材料特别适用于高负荷路面的紧急修复，其性能适配性体现在：

粘结性能：新旧混凝土界面粘结强度提升 30%-50%，对凿毛处理要求宽松，可快速修复检查井周边、坑槽等病害。

韧性保障：掺入钢纤维（1%-2%）后，极限拉应变提升 3-5 倍，刚性接触面（如钢板、石材）下仍能有效抑制裂缝扩展，适应重载交通冲击。

可用在农村公路检查井及雨水口沉陷、路面局部沉陷及坑槽紧急修复工程等。

二、施工工况及工艺流程

以快速修复检查井周边沉陷为例：

（一）工具准备：发电机、振捣棒、铁锹、铁抹子、3 米杠尺、苫布、铁板、水桶、水箱、吹风机等。

（二）材料准备：快硬混凝土、界面剂、等量石子。

（三）施工流程：

1、基层清理：将路面等场所的两面为了保证美观切割出等量的直线，清理施工处至坚硬层并用吹风机将渣土杂物清理干净同时做好现场保护。

2、涂刷界面剂：界面剂搅拌均匀涂刷在施工处表面立面以增加新旧

混凝土粘接作用。

3、现场搅拌：可采用机械或人工搅拌，机械搅拌混凝土的时候要均匀的到入水泥和石子和水（水泥/石子/水的比例是 1/1/14%）。每袋水泥的重量是 25 公斤。人工搅拌混凝土需要先加入 2/3 的水进行搅拌，剩余水均匀泼洒直到搅拌均匀。浇筑方式从一侧连续浇筑并用振捣棒振捣提浆，收面时用杠尺找平，并表面压光（注意平面的平整度有分层及时调整）。初凝后要及时洒水养生（眼看表面泛白冒热气）。



图 1 施工工艺流程

（四）注意事项

1、加水量必须严格控制（水多浆多表面显示光滑但是高概率出现表面裂纹，水少导致收面困难，面层表面粗糙）。

2、振捣是要做到快插慢提防止振捣处出现蜂眼、离析，降低混凝土密实度。另外振捣时间不宜过长（常规条件下一到两秒就行）。浅层局部修复（小于 30 平方厘米）宜采用浅表式附着式振捣，深层大面积修补采用插入式振捣。

3、收面要控制好初凝与终凝时间，不宜过早或过晚。一般夏季 15~20 分钟,冬季 30~40 分钟是最佳收面时间，考虑好施工时天气温度。

4、灌注方式从下游往上游浇灌可以保证混凝土的密实性。

5、25 公斤/袋，储存于阴凉、干燥、通风处，避免受潮、雨林、

日晒，保质期六个月材料禁止二次加水使用，不可加入其它水泥或者添加剂，搅拌后尽快用水冲洗设备。

6、施工深度不能高于三十公分，高于三十公分可采用分层。

三、工程应用情况

针对农村公路路面沉陷、检查井及雨水口周边沉陷进行超早强混凝土修复案例如下：

表 1 工程应用统计表

公路名称	病害类型	修复面积 (平方米)	使用水泥(袋)	施工 时间	修复后是否 再次出现病害
景盛北三街	路面龟裂凹陷	5	8	2024.4	否
景盛北三街	雨水井边缘破损	1	2	2024.4	否
辛桑路	减速梗损坏	35cm*27m	15	2024.6	否
辛桑路	雨水井周边损坏	1	2	2024.5	否
兴华北街	减速梗损坏	35cm*10m	4	2024.8	否
潮马路旧线	路面破损	8	8	2024.5	否
四支路北段	路面破损	20	30	2024.5	否
潮马路旧线	雨水井周边损坏	0.5	1	2025.1	否
景盛北三街	雨水井周边损坏	0.5	1	2025.2	否
马大路支线	雨水井加固	1	3	2025.3	否
柏福村路	路面破损	4	2	2025.3	否
六西路	路面破损	8	4	2025.4	否
景盛北三街	井周加固	3.5	7	2025.4	否
潮马路旧线	路面破损	20	10	2025.4	否
四支路中段	路面破损	2	1	2025.5	否
物流中路	井周加固	164	82	2025.5	否
潮通路	井周加固	4	2	2025.6	否

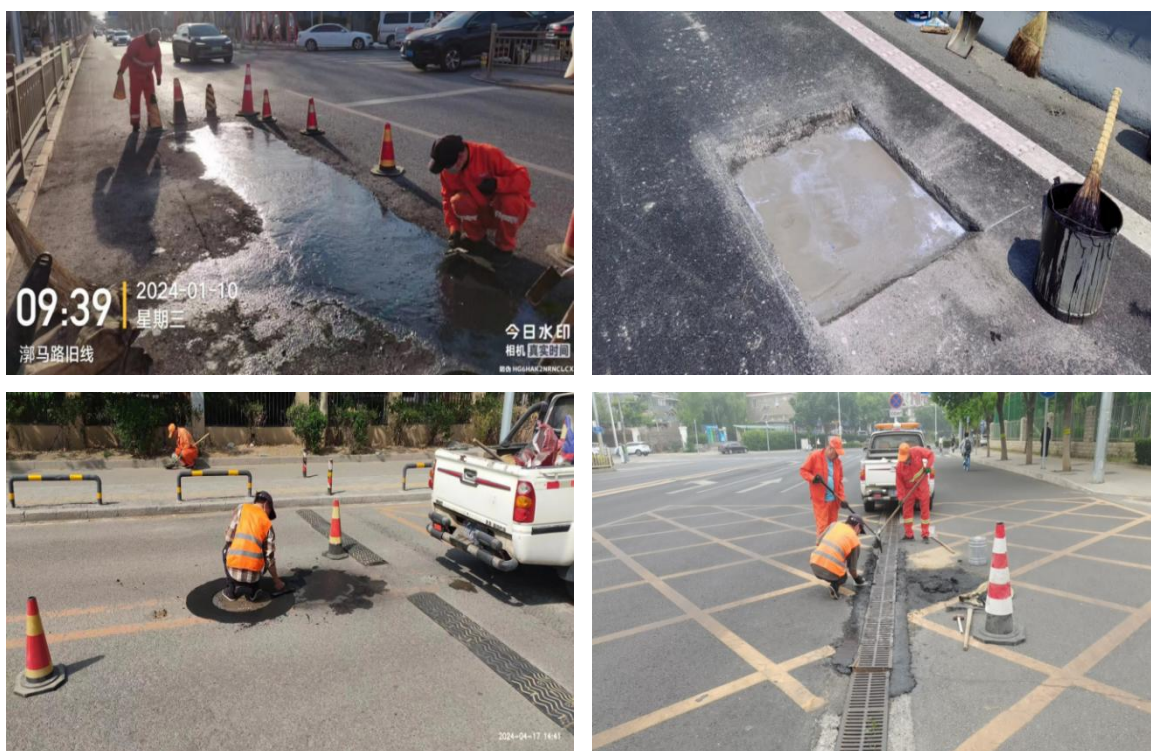


图 2 施工现场

四、成本造价

根据农村公路特点，目前快硬混凝土主要用于替代冷补料使用，对路面坑槽进行修复，按照 4 年使用年限，快硬混凝土综合成本单价为 240 元，冷补料综合成本单价为 576 元，节省了 40% 的成本。

五、应用效果

（一）强度与耐久性提升

1、早期强度高：2 小时抗压强度可达 30MPa，满足通车要求（传统冷补料需 24 小时以上）。

2、长期性能稳定：28 天强度持续增长，抗冻融、耐腐蚀性能优异，减少反复修补频率。

（二）施工效率优化

1、快速开放交通：施工后 2-3 小时即可开放，大幅缩短封闭时间（冷补料需 1-2 天）。

2、简化工艺：无需复杂设备，直接涂抹或浇筑，减少基层开挖量。

（三）环境适应性增强

1、全天候施工：低温（-8℃）及雨天均可作业，克服冷补料潮湿环境粘结力差的缺陷。

2、低碳环保：无挥发性有机物排放，符合绿色养护要求。

（四）经济性与美观性

1、全寿命成本低：减少后期维护费用，综合成本低于冷补料。

2、色差小：与原路面色泽接近，提升美观。

新型沥青路面网裂修复养护技术

河北省故城县交通运输局

一、适用场景

新型沥青路面网裂修复养护技术是一种采用新型常温沥青路面网裂修复剂，配合细粒玄武岩实施的沥青路面网裂修复养护技术。技术核心是采用新型常温沥青路面网裂修复剂，通过涂刷修复剂有效渗透还原沥青路面并封闭填充裂缝，形成路面防水抗渗层，高效解决沥青路面网裂病害防水问题，延长路面使用寿命。

该新型网裂修复养护技术，相比于传统碎石封层、稀浆封层、微表处、雾封层等施工工艺，具有四大优势：一是无需大型机械设备，施工更机动、更灵活、更简便，可大幅降低修复时间及养护成本；二是小面积、零星、分散病害施工时，不需任何机械设备，无须断交，仅需少量施工作业人员，做好现场安全管理，短时实施交通管制，施工完毕即刻开放交通；三是在路况不具备挖补施工条件的前提下，可有效防止雨水、雪融水进入路面基层；四是相比于传统热沥青类材料，能避免传统热沥青加温带来的能源消耗、环境污染、养护工人高温作业的风险。

该新型网裂修复养护技术不受限于公路环境场景、地形地质、气候温度等条件，普遍适用于对缝隙小且密集的沥青路面网裂病害的快速修复，尤其适用于建设标准低、车流量大、不宜长时封闭交通施工的农村公路的修复养护，具有很强的广普性。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

1. 新型常温沥青路面网裂修复剂

一种高固含量、高渗透性、高粘性的绿色环保养护材料。在气温高于-15℃时，无需加温即可施工。市场上有成品销售。

2. 细粒玄武岩

采用市场上普通细粒玄武岩，粒径大小以适合网裂缝隙填充为宜。

(二) 工艺流程

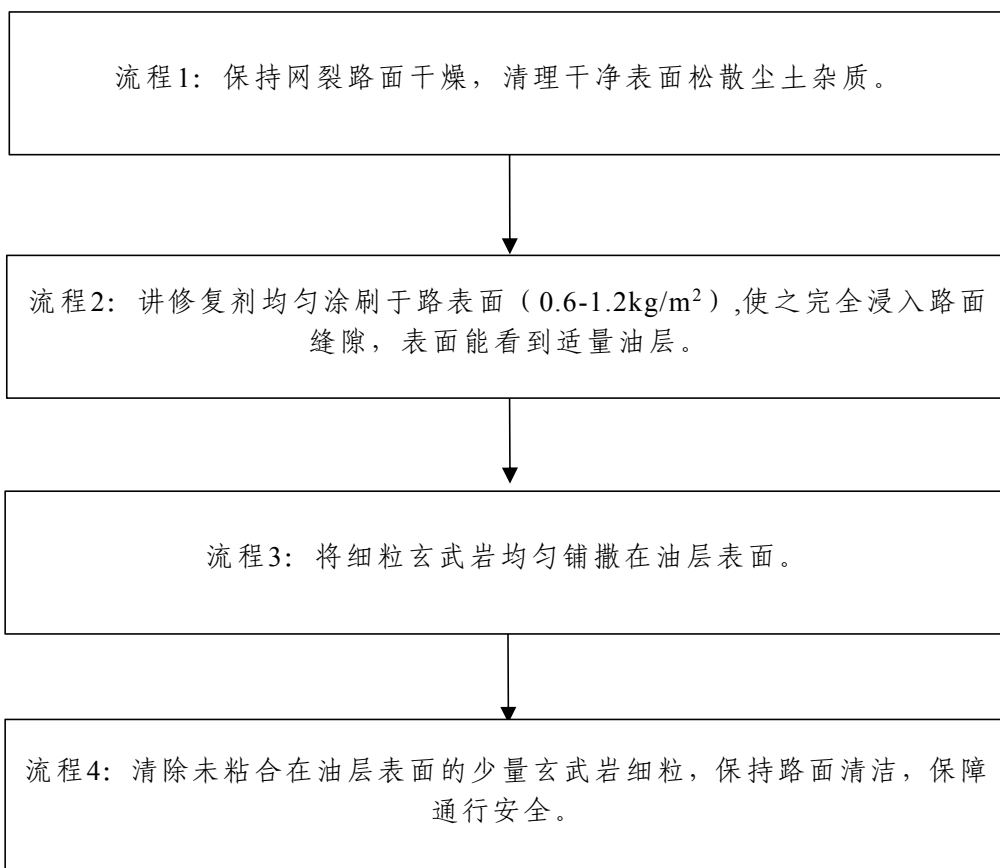


图 1 新型沥青路面网裂修复养护技术施工工艺流程图



图 2 网裂路面清理



图 3 涂刷修复剂



图 4 油层表面铺撒细粒玄武岩



图 5 清除未粘合的细粒玄武岩

三、工程应用情况

2025年5月20日至30日,故城县应用该新技术集中快速完成了X809东大线多处路面网裂修复,修复总面积逾3000m²。东大线为县域南北干线公路,交通量大,不宜断交或长时施工。在施工中仅采取半幅短时限行交通管制措施,做好现场警示设施、临时施工安全标志设置等安全管理工作,按照“四步”施工工艺流程,快速、有效、安全的完成了路面网裂修复养护工作,在取得良好效果的同时,最大化降低了对公路交通的影响。



图6 施工现场

四、成本造价

该新型网裂修复养护技术,对机械设备、施工作业要求宽泛,节省了施工机械设备费用,仅需原材料费用及少量养护人工费,相比于传统碎石封层、稀浆封层、微表处、雾封层等施工工艺,效益显著,可节省成本造价50%左右,经济实用性强。

五、应用效果

对 X809 东大线网裂修复两个月后的追踪调查结果显示，修复路面的状况良好，病害未出现反弹，已得到有效养护治理。



图 7 追踪调查结果

该新型网裂修复养护技术彰显出三点良好的应用效果：一是修复效果佳，有效解决了路面网裂填充、防水，改善了公路通行条件，延长了路面使用寿命；二是养护成本低，实现了大幅下降，有力提高了公路养护资金利用效率；三是施工时间短，施工工艺流程简单高效，较好解决了车流量大、不宜长时封闭交通施工路段的修复养护问题，大幅提升了公路养护技术水平。

沥青灌缝技术

河北省巨鹿县交通运输局

一、适用场景

沥青灌缝对裂缝的类型和规模有较好的适应性，无论是因温度变化产生的横向裂缝、纵向裂缝，还是由于车辆荷载引起的网状裂缝等，都能采用该方法进行处理，而且在不同气候环境、不同交通流量的公路上，只要满足施工工况要求，均可使用沥青灌缝技术，有效保障路面的正常使用性能。沥青灌缝在农村公路养护中适用于以下典型场景：

裂缝修补：当农村公路出现宽度在 0.5-5 厘米的纵向、横向裂缝时，可通过沥青灌缝填充，防止雨水下渗侵蚀路基，避免裂缝扩大。

季节性养护：在气温较低的地区，路面因温差产生收缩裂缝，可在春秋季节（非极端温度时）进行灌缝，提前预防裂缝扩展。

二、施工工况及工艺流程

沥青灌缝施工全解析：在农村公路养护中，沥青灌缝是一项常见且有效的技术，能有效阻止雨水等渗入路面结构，延长公路使用寿命。

（一）施工工况

1、温度条件：施工时路面温度应高于 15℃，环境温度不低于 5℃。在低温环境下，沥青灌缝胶的流动性变差，难以灌入裂缝，且与路面的粘结性下降，影响灌缝效果；高温环境则可能导致灌缝胶流淌，无法形成有效密封。

2、天气状况：选择晴朗、无雨、无大风的天气施工。雨天会使路面潮湿，水分渗入裂缝影响粘结；大风易扬起灰尘，污染灌缝材料与施工面。施工前需关注天气预报，提前做好施工安排。

3、路面条件：裂缝宽度在 0.5-5cm 较为适宜灌缝处理。对于宽度小于 0.5cm 的裂缝，可先进行扩缝处理；大于 5cm 的裂缝，需先填充部分材料后再灌缝。同时，裂缝内不能有积水、泥土、杂物等，施工前必须确保裂缝干燥清洁。

（二）施工流程

1、安全警示设置：在施工路段前后一定距离设置明显的安全警示标志，如警示灯、警示桩、锥形桶等，封闭施工区域，安排专人指挥交通，引导车辆和行人安全通过施工路段。



图 1 安全警示设置

2、裂缝开槽：根据裂缝宽度调整开槽机槽口尺寸，沿裂缝匀速切割出矩形凹槽。开槽深度一般为 2.0-2.5cm，宽度 1.5-2.0cm，确保槽壁垂直、槽底平整。对于不规则裂缝，灵活操作开槽机，保证开槽质量。



图 2 裂缝开槽

3、裂缝清理：用扫帚先清扫凹槽内及槽口两侧的残渣，再使用肩背

式强力吹风机，以不低于 0.6MPa 的风压，将裂缝内的灰尘、碎屑和杂物彻底吹净，同时蒸发掉裂缝内的潮气和水分，增加灌缝料与裂缝壁面的粘接效果。



图 3 裂缝清理

4、沥青加热：将优质改性沥青灌缝胶加入灌缝机加热罐，启动加热装置，将沥青灌缝胶加热至 180-200℃，加热过程中持续搅拌，保证灌缝胶受热均匀，防止局部过热碳化。

5、灌缝作业：当灌缝胶达到施工温度后，将灌缝机的压力喷头对准裂缝，均匀地将灌缝胶灌入槽内，灌注时要自上而下充分填满，避免下部产生气孔气洞，灌缝高度略高于路面 1-2mm，形成微微凸起的密封层。



图 4 灌缝作业

6、撒布石屑：灌缝完成后，立即在灌缝胶表面均匀撒布一层 2-5mm 粒径的干净石屑，石屑用量控制在 $0.3-0.5\text{kg}/\text{m}^2$ ，然后用扫帚或轻型碾压设备将石屑轻压嵌入灌缝胶中，增强表面抗滑性和耐磨性。



图 5 撒布石屑

7、开放交通：灌缝胶完全凝固后（一般 15-30 分钟，具体时间受温度、湿度等因素影响），清理施工现场，拆除安全警示标志，开放交通。

三、工程应用情况

沥青灌缝技术在工程中应用广泛，是处理路面裂缝的常用方法，如在县道巨广线公路的病害养护处置。在巨广线沥青路面通车运营一段时间后，由于过往大型车辆增多和夏季昼夜温差大，路面出现横向和纵向裂缝，这些裂缝不仅影响行车舒适性，还会使雨水下渗，侵蚀路面基层，加速路面损坏，巨广线沥青灌缝处理路面裂缝 16000 延米后，路面裂缝得到有效修复，雨水下渗现象显著减少，路面结构稳定性增强，修复后的裂缝未出现明显扩展，路面平整度保持良好，有效延长了路面使用寿命，降低了农村公路的养护成本和安全隐患。

四、成本造价

沥青灌缝成本经济实惠，与大面积铣刨重铺等路面修复方式相比节省了 60% 成本，能大幅降低养护成本同时，达到良好修复效果，尤其适用于资金相对有限的农村公路养护。从材料成本看，公路灌缝胶价格适中，且

用量根据裂缝长度和宽度确定，不会造成材料的过度浪费；在施工成本方面，由于施工效率高、工期短，人工成本和设备租赁成本也得到有效控制。沥青灌缝技术的成本造价受多种因素影响，不同工程场景下差异较大；前期准备费用：裂缝清理工具（如高压吹风机、铣刨机）的租赁或购置费用，以及施工前的路面清扫、安全围挡等，约占总成本的 10%-20%。

五、应用效果

在正常使用和合理养护的情况下，沥青灌缝技术可使处理后的裂缝在较长时间内保持良好的密封状态，有效减少路面病害的发生，提高公路的使用性能和服务质量。例如，在交通量较大的县道巨广线上，采用该技术处理裂缝后，路面的使用寿命可延长 3-5 年甚至更长时间。

总之，沥青灌缝技术具有成本经济实惠、适用性广泛、延长路面使用寿命等优点，是路面裂缝防治的重要手段之一。同时，由于施工时间短、对交通影响小，灌缝作业完成后能迅速开放交通，保障了公路的正常通行能力，减少了因公路施工造成的交通拥堵和延误。可以在农村公路养护工作中得到广泛应用。

桥面伸缩缝处积水病害维修技术

上海市崇明区交通委员会

一、适用场景

有许多箱梁、钢梁结构的桥梁，在桥面伸缩缝保护带的上端沥青里存在有积水的问题，这些积水造成行车打滑，尤其是冬季引起路面结冰，造成的危害更大。交警部门多次提出这个问题，希望尽快解决，消除隐患。

产生积水的主要原因：

- 1、沥青渗水，通过孔隙渗到沥青层下面，而桥面设计有纵坡及横坡，水就顺着坡度往下流至最低点，流到型钢伸缩缝的白带前面。
- 2、因混凝土保护带的阻挡，水没有下泄通道，就溢出来，积存在这个位置。
- 3、非机动车道上同样存在这样的问题，而且比车行道还严重，积水会通过排水管倒流到机动车道上。

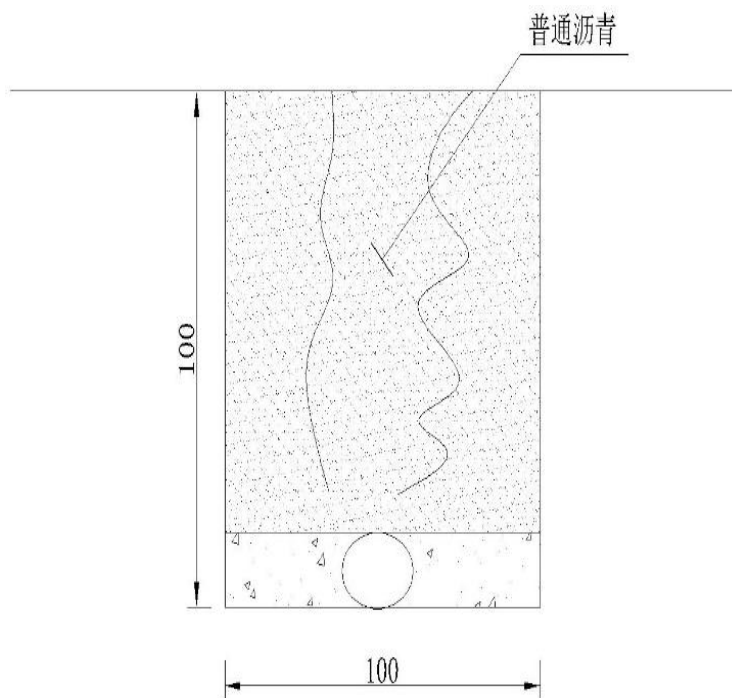


图 1 崇明大道桥梁伸缩缝积水情况

二、施工工况及工艺流程

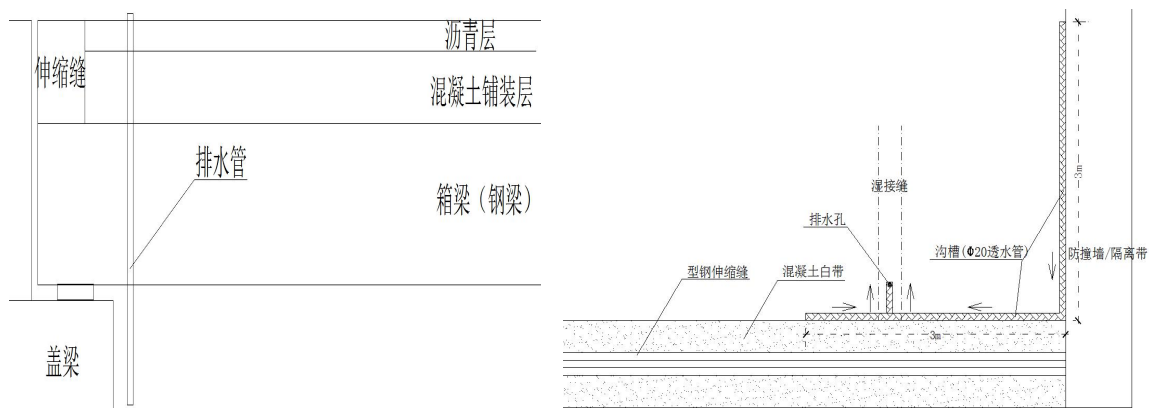
建立一个排水系统，把积水排出，让路面上没有水。同时排水孔设置要避开墩台位置，避免后续排水时水滴落到盖梁上。

普通沥青比较脆，修补排水沟槽后容易损坏。而弹性混凝土具有一定的弹性及塑性，修补沟槽后能达到很好的效果。



(一) 钻孔

在距离积水处最近的湿接缝上或边侧从上往下进行开孔，完成后穿入排水管。

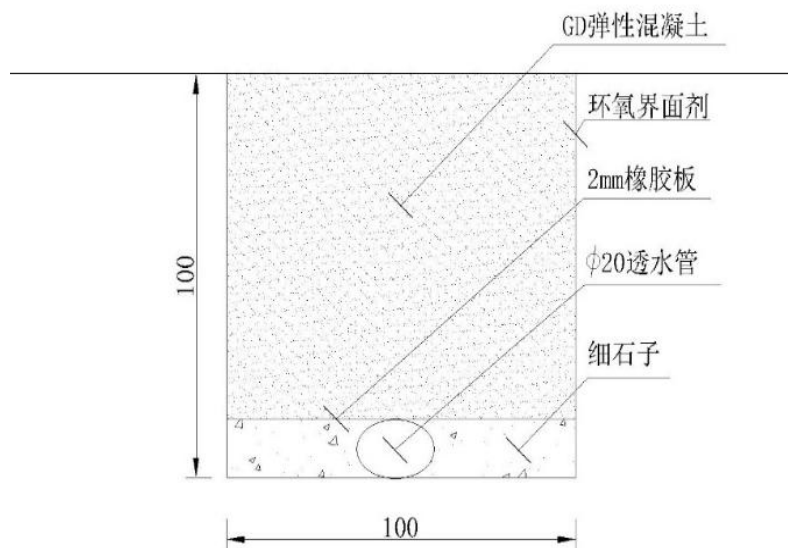


（二）开槽引流

沿着型钢伸缩缝白带和隔离带/防撞墙以及湿接缝开孔穿管位置，在沥青铺装上开一条 10cm 深、10cm 宽的连通沟槽，在沟槽底部设置一根 $\Phi 20$ 的透水管，与湿接缝处的排水管连接，通过湿接缝底部伸出的透水管进行排水。

（三）恢复沟槽

沟槽恢复：用细石子将透水管填埋掉，然后上覆盖一块橡胶板，槽两侧涂刷环氧粘结剂（用量 $2\text{kg}/\text{m}^2$ ），最后用 GD 弹性混凝土进行填缝。



（四）实施过程

- 1、开槽：在沥青上对沟槽进行划线定位，然后进行切割清理，槽宽 10cm，深度 10cm。
- 2、开孔：确定好钻孔位置，在沟槽内从上往下进行钻孔并安装好排水管。
- 3、透水管安装：槽内清理完成后，在槽底设置一根 $\Phi 20$ 的透水管，并与开孔处的透水管相连接。
- 4、石子填埋：用细石子将透水管填埋掉，石子间的空隙能保证水能渗入到管子里。
- 5、橡胶板覆盖：用 2mm 厚的橡胶板将透水管及石子覆盖掉，防止弹

性材料渗入到石子空隙内，影响渗水效果。

6、界面处理：用环氧树脂对槽两侧进行涂刷，用量 $2\text{kg}/\text{m}^2$ ，加强界面处的粘结。

7、弹性混凝土填缝：在环氧树脂固化前，浇筑完弹性混凝土并结面。

8、开放交通：施工完成，待弹性混凝土冷却 2h 后，即可开放交通。



图 2 切割、开槽



图 3 钻孔排水



图 4 透水管敷设



图 5 弹性混凝土沟槽恢复

三、工程应用情况

2024 年 12 月在崇明大道四滙港桥、六滙港桥等 11 座桥梁的养护维修中，针对伸缩缝处积水病害，采用该技术进行了维修。共计维修积水点 49 处，开槽、排管、沟槽恢复总长度 294m。

四、成本造价

每处渗水点维修时，开槽长度约 6m 左右，维修综合单价与伸缩缝处沥青铣刨加罩维修对比（ $3\text{m} \times 3\text{m} = 9\text{m}^2$ ），维修单价下降约 33% 左右。

五、应用效果

崇明大道 11 座桥梁积水点维修后，后续伸缩缝处未出现积水、结冰等问题，维修后效果较好，有效减少公路交通安全隐患。



图 2 崇明大道桥梁伸缩缝积水病害维修后效果

农村公路路面裂缝坑槽快速修复技术

安徽省濉溪县交通运输局

一、适用场景

适用于平原微丘区，四季分明，冬季最低气温可达 -10°C 左右，存在季节性冻融循环。农村公路沿线地形以平坦开阔为主，局部路段因沟渠、小型河塘跨越，形成微地形起伏；地质多为粉质黏土，部分路段下伏厚度 $0.5\text{--}2\text{m}$ 砂层，遇水易软化，影响路基稳定性。

主要用于路面坑槽：降水下渗至基层，粉质黏土基层受冲刷淘空，加之农机、客运车辆高频冲击，形成直径 $0.3\text{--}1.5\text{m}$ 、深度 $3\text{--}10\text{cm}$ 坑槽，雨季集中爆发。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料、设备与人员分工

1、材料要求

路面裂缝修补：采用 SBS 改性沥青密封胶，适配淮北市温差， -10°C 低温下延伸率 $\geq 300\%$ ， 180°C 高温不流淌，与沥青路面粘结强度 $\geq 0.6\text{MPa}$ ，保障冬季抗裂、夏季抗流淌。

路面坑槽修补：选用 C30 早强商品混凝土（配合比：水泥：砂：碎石：水 $=1:1.8:3.2:0.45$ ，掺加 5%早强剂），24h 强度达设计值 80%，72h 达 100%，满足农村公路“早通车、少封路”需求。

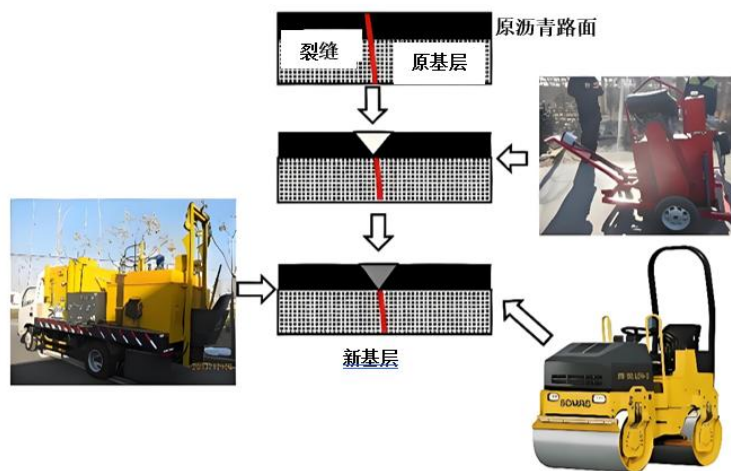


图 1 路面坑槽修补工艺

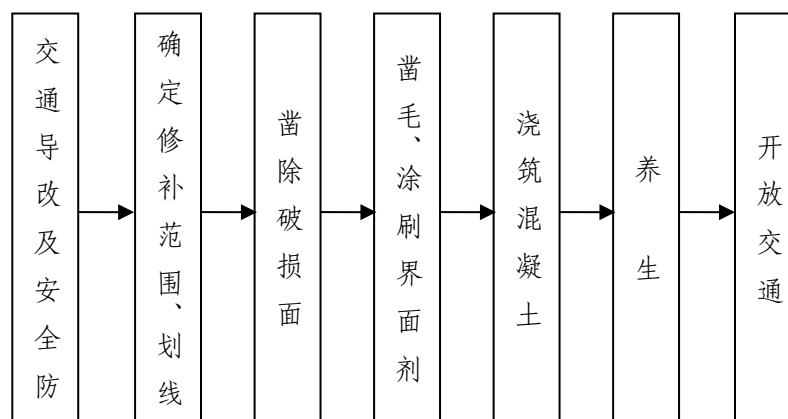


图 2 路面坑槽修补工艺

2、设备类型

裂缝处理：电动开槽机、智能灌缝机（精准控温 180-200℃，带搅拌功能防密封胶分层）。

坑槽修补：小型路面铣刨机、1t 小型压路机、混凝土振捣棒。

（二）施工流程图

A[交通封闭][铣刨坑槽]-->B[清理基层][浇筑混凝土]-->C[振捣找平][覆盖养护]-->D[开放交通]

步骤 1：交通封闭与安全布控。

施工前 1 天，在作业路段两端 50m、200m 处，依次设置“前方施工”“减速慢行”“公路变窄”警示标识，用反光锥桶封闭半幅车道（单车道全封闭），保障施工期间人车分流。

步骤 2：坑槽铣刨与清理

技术工操作小型铣刨机，沿坑槽边缘向外扩展 5-10cm 铣刨，深度至坚实基层（一般 5-12cm），铣刨后坑槽呈规则矩形/圆形；普工用铁铲、吹风机清理废渣、灰尘，10 分钟内完成 1 个 1m² 坑槽清理，确保坑槽界面干燥、洁净，无松散颗粒。

步骤 3：混凝土浇筑与振捣

转运 C30 早强混凝土至坑槽，技术工分层浇筑（每层厚 3-5cm），用振捣棒“快插慢拔”振捣，每次振捣时间 20-30s，至表面泛浆、无气泡；

浇筑完成后，用铝合金刮尺找平，误差 $\leq 3\text{mm}$ ，同步覆盖塑料薄膜+土工布养护，夏季养护 2 天、冬季养护 5 天。

步骤 4：交通开放与成品保护

养护期间，加强巡查，防止农机、牲畜破坏；达到混凝土强度后，拆除警示标识，开放交通，初期限制重载车辆通行（载重 $\leq 10\text{t}$ ）。

三、工程应用情况

（一）项目概况

在淮北市濉溪县农村公路养护项目中应用，涉及 X101、X202 等多条县公路，总里程 21 公里（其中水泥路面 15 公里）。

（二）应用数据

路面裂缝修补：累计处理横向裂缝 12 条、纵向裂缝 10 条，总长度 1500 米（最长单条裂缝 120 米，最短 3 米）。



路面坑槽修补：修复坑槽 16 处，总面积 420 平方米（最大坑槽 $1.5\text{m} \times 1.2\text{m} \times 0.1\text{m}$ ，最小 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.05\text{m}$ ）。

四、成本造价

该养护技术每公里造价（材料+设备+人工）对比传统工艺，在裂缝修补方面，有效减少了传统热沥青灌缝，因低温易脆裂，每年需重复修补，改性沥青密封胶 3 年复发率 $\leq 10\%$ ，每公里综合养护成本降低约 30%。在

坑槽修补方面，传统素混凝土（无早强剂）养护 7 天，易因通车早开裂，返工率 30%；C30 早强混凝土 3 年返工率≤5%，长期成本降低约 10%。

五、应用效果

（一）施工质量检测

裂缝修补：养护后 6 个月检测，密封胶与路面粘结强度≥0.55MPa（设计值 0.6MPa），经历 3 次冻融循环（-10℃-25℃）、10 万次模拟车辆荷载（轴重 10t），仅 2 条裂缝出现 1-2mm 细微开裂，复发率 3.2%，远低于传统工艺。



坑槽修补：混凝土 7 天强度达 32MPa（设计值 30MPa），平整度误差≤2.5mm（规范≤3mm），与原路面接缝处，经 1 年通车测试，未出现啃边、脱层。



（二）实际应用反馈

通行体验：养护后公路平整度提升，农机、客运车辆行驶颠簸感降低，群众出行满意度从 65% 升至 95%。

管养效率：病害复发率显著降低，裂缝类年度复发率从 45% 降至 6%，坑槽类从 38% 降至 4%，公路大中修周期从 8 年延长至 12 年，每年节约管养资金 260 万元。

因地制宜破难题 灌缝技术护公路

江西省万载县交通运输局

一、使用场景

一是温差导致的裂缝，农村地区气候条件多变，夏季高温与冬季低温交替，沥青或水泥路面易因热胀冷缩产生裂缝。通过灌缝处理，可及时填充缝隙，防止雨水、雪水渗入路基，延长农村公路使用寿命。二是载荷引发的裂缝，随着经济的发展，农村公路交通量大，重载车辆多，频繁碾压易使路面出现裂缝。灌缝能够加固路面，阻止裂缝进一步扩展，保障群众出行的安全顺畅。三是路基沉降导致裂缝，部分农村公路路基夯实不足或受雨水冲刷等影响，易发生不均匀沉降，导致路面产生不规则裂缝。灌缝可有效密封这些裂缝，防止路基进一步损坏，避免路面塌陷等严重病害的发生。四是预防性养护，针对建成年限较长、出现细微裂纹的农村公路，灌缝是一种经济高效的预防性养护手段。在病害初期及时灌缝，能延缓路面老化速度，降低大面积翻修的成本，维持农村公路的基本通行功能。

二、施工工况及工艺流程

万载县山区地形复杂，部分路段坡度大、弯道急，且雨季长、昼夜温差大。针对复杂工况，施工团队严格标准化施工，保障灌缝胶路面粘结效果显著。具体如下：

1、准备工作：检查开槽机、灌缝机等设备性能，将灌缝胶加热至 190°C （误差 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ ），同步设置安全警示标志，划定封闭施工区域。

2、精准开槽：依据裂缝宽度调整开槽参数，3mm 以下的常规裂缝按 1.0-1.25cm 宽、2.0-2.5cm 深开槽；确保开槽深宽比 $\leq 2:1$ 。

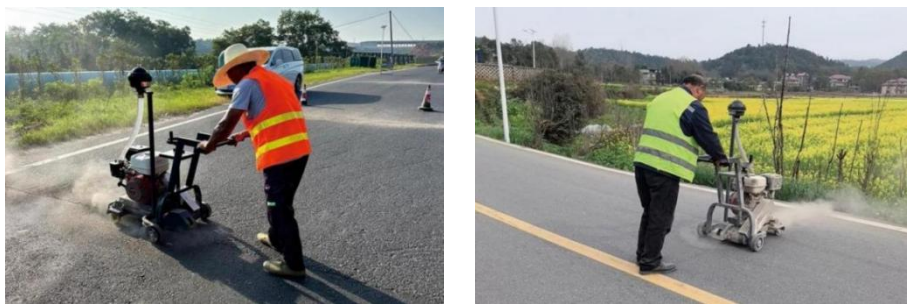


图 1 精准开槽（切缝）

3、深度清理：采用“扫帚初扫+高压风机吹扫”双重清洁，清除裂缝内灰尘、碎屑，并利用热风枪预热壁面，提升粘结效果。



图2 深度清理

4、高效灌缝：以 190℃ 熔融态灌缝胶填充，借助“U”型刮平器控制灌缝高度略高于路面 1-2mm，确保饱满填充，15-20 分钟固化后开放交通。



图3 高效灌缝

三、工程应用情况

2024 年起万载县鼓励、引导养护小修公司购买专业的灌缝机械，首先对万载县县公路面裂缝进行排查摸底，2024 年投入 80 余万元对县道启动路面裂缝灌缝工作，2024 年 9 月集中对 X505 三兴至 G320、X817 瓦棚山至石蛇；X504 南垣至九龙；X802 罗城至镇北；X501 研陂至双桥；X508 万载至茭湖等 6 条县道实施灌缝工程，累计处理裂缝 16 公里。2024 年 11 月在杭桥至罗城、香山至杭桥等专项混凝土公路实施灌缝工程，灌缝技术

成功抑制混凝土路面断板问题。2025 年 3 月集中对 X693 淖源至界岭、X843 马步至槐溪、X507 岭东至株潭、X505 三兴至 G320、X501 研陂至双桥等 5 条县道实施灌缝工程，公路通过及时灌缝后，路面新出现病害明显降低，极大节约了公路维修成本。同时为了系统处理万载县的县、乡、村公路路面裂缝，万载县 15%的乡镇日常养护经费用于农村公路乡、村公路路面灌缝，实现万载农村公路县、乡、村公路路面灌缝常态化全覆盖，实现农村公路精细化养护。

四、成本造价

万载县创新采用“成本+利润”计价模式，具体构成为材料成本+人工成本+机械成本+9%管理费及税金+10%利润。该模式通过公开成本核算流程，可以有效避免价格虚高，同时保障施工单位合理收益，达到了灌缝工作有企业愿意做，公路管理单位控制了成本的双赢局面，实现质量与成本的平衡。

五、应用效果

工艺改造前，传统灌缝材料与路面的粘结效果不佳，容易出现脱落、开裂等情况，密封效果不持久，水分易渗入基层，导致路面病害进一步发展，需进行频繁修补。采用新工艺后，灌缝材料由传统的沥青油改为了专用灌缝胶，机械化操作替代手工操作，增加了开槽步骤，进行了深度清理，保证了灌缝后裂缝不扩大，做到了及时发现及时处理，有效延长了公路使用年限。

表 1 材料及工艺效果对比

特性	传统工艺	现代工艺
材料性能	普通沥青，性能有限	高性能灌缝胶，弹性好、耐久性强
施工精度	手工操作，精度较低	机械化操作，精度高
耐候性	易受温度影响，夏季流淌冬季脆裂	高低温性能稳定，抗老化能力强
使用寿命	较短	可质保三年及以上
环保性	可能存在溶剂污染	环保无害，无溶剂

X505 三兴至 G320 沥青路县道作为万载县工业园与外部的交通纽带，车流量较大，车辆载荷重，路面裂缝发生率较高，如采用传统方式，将沥青用容器灌缝难以控制沥青料高于路面的高度，灌缝处高于路面，而新工艺使用灌缝机将熔化的灌缝胶均匀地灌入裂缝中，并用刮平器将表面刮平，保证路面平整，且采用专用灌缝胶灌缝后有效防止雨水等通过裂缝侵蚀入沥青路面水稳层，延缓路面破损，同时减少裂缝扩大，填补裂缝后显著提升行车舒适性和安全性，有效节约工业园物流等社会成本，为县域经济发展提供坚实交通保障。同时对杭桥至罗城专项公路等水泥混凝土路面实施灌缝工程后，有效抑制裂缝在车辆载荷等环境作用继续开裂，降低混凝土路面断板风险。延长路面使用寿命，综合养护成本减少。

万载县通过因地制宜，采用专用沥青灌缝胶技术精准养护，形成了可复制推广的养护模式，为农村公路路面裂缝病害治理提供了实践范例。

农村公路路面坑槽裂缝处置技术

山东省新泰市交通运输局

一、使用场景

农村公路是乡村振兴的重要基础设施，是加快农村经济发展的重要条件，它不仅能促进农村物流、信息流，还能改善农民的出行条件，优化资源配置，促进思想观念的转变和繁荣农村经济。农村公路日常养护工作尤为重要，其养护技术需结合“低成本、易操作、可持续”的特点，合理选择技术方案。

表 1 农村公路常见病害类型

病害类型	主要表现	成因分析
路面裂缝	纵向/横向裂缝、网裂	材料老化、温差应力、基层不稳
坑槽与松散	局部凹陷、骨料脱落	水损害、重载碾压、施工缺陷
沉陷与车辙	路面下沉、轮迹带凹陷	路基压实不足、排水失效
边坡水毁	坍塌、冲沟	雨水冲刷、缺乏防护
排水设施损坏	边沟堵塞、涵洞淤积	养护不及时、设计不合理

二、施工工况及工艺流程

（一）水泥路面裂缝修复

1、材料与设备

表 2 材料设计表

类别	具体要求
材料	聚氨酯密封胶、高弹改性沥青、裂缝清理工具（钢丝刷、高压气泵）
设备	灌缝机、切割机（用于扩缝）、安全警示标志
人员分工	技术员1名（指导工艺）、工人2名（清理+灌缝）、安全员1名（交通疏导）

2、施工流程

[裂缝检测]→[清缝(高压气吹+钢丝刷)]→[扩缝(视裂缝宽度)]→[灌胶]→[压实抹平]→[开放交通(固化后)]

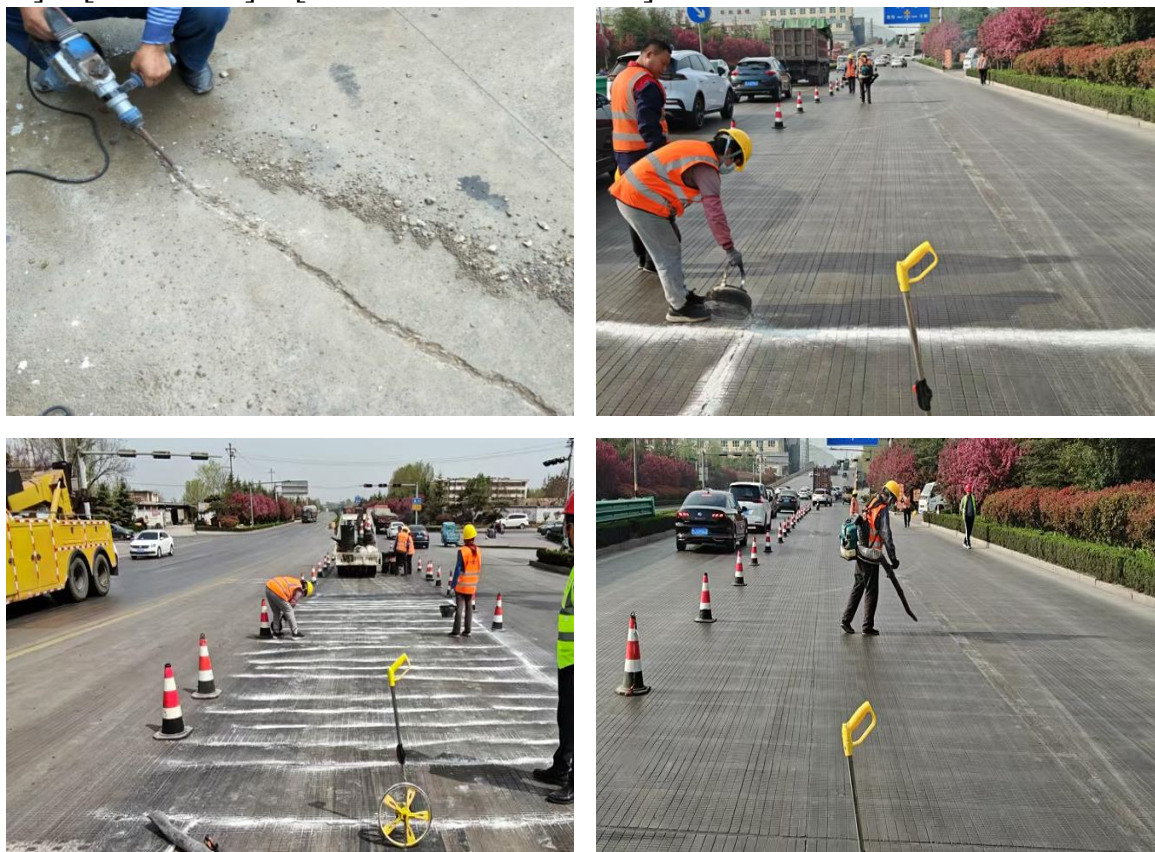


图 1 水泥路面裂缝修复施工流程图

3、技术要求

清缝深度 $\geq 3\text{cm}$ ，确保无杂物。

灌缝胶填充需饱满，溢出部分及时刮平。

(二) 沥青路面坑槽修补(热拌沥青法)

1、材料与设备

表 3 材料设备表

类别	具体要求
材料	热拌沥青混合料(AC-16)、乳化沥青(粘层油)、冷补料(应急修补)。
设备	切割机、铣刨机、压路机(小型)、沥青保温车。
人员分工	技术员1名、机械操作手2名、辅助工人3名。

2、施工流程图

[划定修补范围]→[切割凿除破损路面]→[清理基槽]→[涂粘层油]→[摊铺沥青混合料]→[分层压实(2~3遍)]→[开放交通(冷却至 50℃ 以下)]



图 2 沥青路面坑槽修补施工流程图

3、关键技术

坑槽边缘需切割成矩形，垂直度误差 $\leq 5\text{mm}$ 。

压实需从边缘向中心推进，避免材料推移。

三、工程应用情况

案例：新泰市县道养护工程裂缝修复（2024 年）。

应用路段：牛石路 K2+300~K3+100（总长 800m）。

处置面积：修复裂缝总长 1200 延米。

四、成本造价

（一）裂缝修复：低成本预防性养护的典范。

水泥路面裂缝修复技术(如聚氨酯密封胶灌缝)展现出极佳的经济性。其综合单次修复成本(含材料、小型设备租赁、人工)约为 15-20 元/延

米。这一成本水平远低于后期裂缝恶化导致的坑槽、网裂等更严重病害的修复成本（后者往往涉及铣刨、摊铺等工序，成本急剧上升至数百元/平方米）以及彻底翻修或重建路面的巨额费用。

（二）坑槽修补：精准修复保障长期效益。

1、沥青路面坑槽采用热拌沥青混合料修补，其综合单次修复成本约为 80-120 元/平方米。虽然单次投入高于裂缝修复，但其技术优势在于修复质量高、使用寿命长（≥5 年）。

2、综合成本效益体现。相较于使用冷补料等临时性或低耐久性修补材料（可能需频繁返修，累积成本更高），规范的“热拌法+压实”虽然初始投入略高，但其长寿命特性显著减少了同一位置的重复维修次数和关联成本（如二次封闭交通、二次人工设备投入）。相较于小修小补拖延成大病后的局部重建或大面积翻修，及时规范的坑槽修补避免了病害范围扩大和维修成本的指数级增长。

（三）总体效益：低成本技术驱动降本增效。

将水泥裂缝修复（低成本预防）与沥青坑槽修补（高质精准修复）结合应用，是新泰市农村沥青路面坑槽修补修复技术（如热拌坑槽修补）处置已发生的结构性损坏，有效减少了昂贵的大型维修工程频率和规模。降低了因路况恶化导致的车辆损耗增加、通行效率下降等间接社会成本。显著优化了有限的农村公路养护资金投入产出比，实现了单位养护资金效能的最大化。

五、应用效果

（一）显著提升路面质量与耐久性。

1、裂缝修复：采用规范化的清缝、扩缝及高质量密封胶灌缝工艺后，有效阻止了水分下渗侵蚀路基，裂缝处治区域渗水现象基本杜绝。修复后的裂缝使用寿命显著延长，普遍达到 3 年以上，减少了因裂缝扩展引发的路面大面积损坏风险。

2、坑槽修补：严格按照“方补圆、深补浅”原则切割、清理基槽，并应用热拌沥青混合料分层压实修补后，修补区域压实度均达到 93%以上，

与原路面结合紧密、平整度高。此类修补结构稳定，在正常交通荷载下使用寿命可达5年或更久，有效消除了行车安全隐患和颠簸感。

（二）有效降低全周期养护成本。

这些技术方案的核心优势在于“低成本”。如水泥路面裂缝修复，材料成本（15-20元/延米）和设备投入（主要依赖小型灌缝机）均显著低于大面积翻修。沥青坑槽修补虽单次成本相对较高（材料80-120元/平方米），但其较长的使用寿命（≥5年）大幅减少了同一位置的重复维修频次。相较于病害扩大后进行昂贵的整体处置，及时、精准地应用这些养护技术显著降低了农村公路全寿命周期的养护总成本，提高了养护资金使用效益。

（三）提升通行安全性与舒适度。

及时修复裂缝和坑槽等病害，直接消除了路面坑洼、松散等安全隐患，显著降低了行车事故风险，特别是对摩托车、农用车等农村常见交通工具。平整的路面极大地改善了行车舒适性。村民满意度调查显示，技术应用后，相关路段的出行舒适度感知提升了90%。公路通畅性的改善，减少了车辆损耗和通行时间。

（四）增强公路服务能力与可持续性。

有效养护保障了农村公路的基本通行功能，确保农产品运输、村民出行、学生上学等基本需求得到满足，支撑了农村物流畅通和经济发展。通过低成本、易操作的技术手段及时处理病害，遏制了病害的快速蔓延，延缓了路面状况的恶化速度，延长了公路的整体使用寿命，是实现农村公路“可持续”养护目标的关键实践。

（五）提高养护效率与及时性。

所采用的技术工艺流程清晰，设备要求相对简单（如灌缝机、小型铣刨机、压路机），操作易学，便于在基层养护队伍中推广和应用。这使得对小规模、分散的病害能够做出快速响应和处理，大大提高了养护工作的效率和及时性。

水泥毯在农村公路截水沟中的应用

湖北省远安县交通运输局

一、适用场景

本技术聚焦农村公路边坡上部截水沟病害治理，适配山区农村公路易受小型落石塌方威胁、因防水失效引发坡面冲刷、水土流失等场景。针对截水沟防水破损、土体渗水失稳致落石塌方等病害，在地形地质复杂、运输条件有限的农村公路边坡，可高效解决截水沟防护及地灾隐患问题，保障排水功能与坡面稳定。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工准备

材料要求：根据沟渠设计宽度和长度定制尺寸的水泥毯，需具备良好的柔韧性、防水性与快速固化特性，满足截水沟施工及地灾防护强度需求；U型或L型锚固钉（长度根据土质确定，通常 $\geq 30\text{cm}$ ）；搭接专用胶粘剂（可选）。

设备类型：小型运输工具（如山地搬运车）用于材料运输；裁剪工具（美工刀、剪刀）、固定用锚具及简单摊铺工具（如撬棍辅助展开）；锤子；卷尺；洒水设备（喷雾器或花洒）；简易搅拌桶（若需使用胶粘剂）；劳保手套。

人员分工：施工负责人1名，统筹截水沟施工工作；施工人员2-3名，负责基面清理、水泥毯裁剪、摊铺、固定、浇水养护；质量监督员1名，把控施工质量与防水效果。

（二）施工工艺流程

- 1、测量放样：确定截水沟走向位量。
- 2、基面处理：清理截水沟坡面杂物、松散土石，修整截水沟线形，确保基层平整。
- 3、裁剪铺设：依据截水沟尺寸裁剪水泥毯，沿截水沟坡面由上至下摊铺，借助锚具固定两端及关键部位，保证与坡面贴合紧密，对于有弧度或转折处，合理裁剪适配，避免褶皱影响防水与强度。

4、锚固：沟底沟壁边缘用 U/L 型钉固定，间距 30-50cm。

5、搭接处理：涂抹胶粘剂或直接重叠压实。

6、固化成型：水泥毯遇水发生水合反应快速固化，可采用洒水或利用自然降水（提前关注天气），固化过程中避免外力扰动，确保形成连续、完整的防护层。

7、自然养护：大于等于 24 小时初凝，避免踩踏。

（三）施工和易性与技术要求

和易性：水泥毯柔韧性好，便于在山区截水沟复杂坡面摊铺，裁剪操作简单，运输时可卷叠，适应山地狭小运输空间，降低施工难度。

技术要求：基面需基本平整、坚实，无积水、淤泥；水泥毯铺设需平整无褶皱；在坡面或土质疏松处锚固需加密锚钉；浇水必须充分、均匀，水温宜在 5-30℃；固化初期（24-48 小时）避免承受冲击荷载或强烈冲刷；固化后强度需满足抵御坡面小型落石冲击及长期雨水冲刷，防水渗透系数符合截水沟防水标准。

三、工程应用情况

在龙凤至张家湾公路建设中应用，截水沟总长 30 米，水泥毯应用面积 45 平方米，边沟 1100 多米，水泥毯应用面积 1500 平方米。有效解决截水沟及边沟防水失效问题，施工期间及后期未因防水缺陷引发落石塌方次生灾害，保障坡面稳定。



图 1 工人正在用锤子将锚固钉打入沟底及两侧边缘进行初步固定



图 2 已完工的截水沟水泥毯

四、成本造价

采用水泥毯施工截水沟、截水沟基于材料、设备、人工等综合成本约 50 元/米，整体造价约 53350 元，较传统防水防护工艺，节省约 70%造价的同时，减少了高边坡施工的材料运输量（水泥毯重量轻），降低了高山作业风险，间接节约管理成本。从施工经济性看，材料运输简便、施工速度快，长期因减少落石塌方修复、防水维护费用，经济实用，适配农村公路养护资金有限特点。

五、应用效果

（一）施工质量

水泥毯与截水沟坡面贴合紧密，固化后形成连续、高强度防护层，防水性能通过闭水试验验证，抗冲刷能力强，有效阻断雨水下渗坡面，避免因渗水引发土体失稳、落石塌方，强度发展快（24 小时可达 15MPa 以上），满足截水沟承载需求。

（二）应用效果

施工后，截水沟排水功能正常，坡面因防水及防护到位，小型落石塌方隐患消除，边坡上部稳定性显著提升。经雨季等关键周期监测，截水沟无破损、渗漏，坡面未出现新的因水毁或落石引发的病害，保障了周边公路及坡下区域安全，在截水沟地灾防护应用中效果良好。

沥青砼路面裂缝经济型处置在农村公路养护中的应用

湖南省花垣县公路建设养护中心

一、使用场景

本案例分享的技术名称为沥青砼路面裂缝经济型热熔开槽灌缝技术，适用于农村公路沥青砼路面中早期出现的非结构性裂缝经济型养护处置。具体场景包括：

（一）裂缝类型

- 1、伸缩裂缝、干缩裂缝：宽度在 3mm 至 15mm 之间。
- 2、纵向裂缝、施工缝：宽度在上述范围内的纵向裂缝。
- 3、轻度反射裂缝：基层裂缝向上反射，宽度适中（通常 5mm-15mm），边缘轻微碎裂。

（二）裂缝特点

裂缝较直，深度贯穿面层或接近基层顶部，需要有效阻止水分下渗。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工工况

- 1、环境条件：宜在干燥、温暖（环境温度 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ ）的天气下施工；雨雪天气及路面潮湿时严禁施工；推荐在春季或秋季进行。
- 2、裂缝状况：适用于农村公路沥青混凝土路面中早期出现的非结构性裂缝，裂缝宽度在 3mm 至 15mm 之间。
- 3、路面状况：裂缝区域结构基本稳定，无严重唧泥、沉陷或大面积松散。

（二）工艺流程

1、施工准备工作

（1）灌缝材料选用高弹性橡胶改性热熔胶（软化点 $\geq 90^{\circ}\text{C}$ ），橡胶的加入显著提升了热熔胶的弹性和韧性，使其在粘接后能够承受更大的拉伸和变形而不易断裂。

（2）辅助材料选取钢丝刷、凿子、高压吹风机/空压机、液化气喷火

枪（可选，用于加热路面增强粘结）、小型柴油加热釜（100L）替代传统大型设备，降低油耗、手持式开槽机（小型，槽宽约 1-2cm，槽深约 1-2cm）、灌缝壶/挤压枪、扫帚、隔离材料（如滑石粉或细砂）。

（3）人员分工：2-3 人一组。1 人操作开槽机并初步清理，1 人负责精细清理、吹尘、灌缝，1 人协助清理、材料准备、交通引导。

2、施工操作

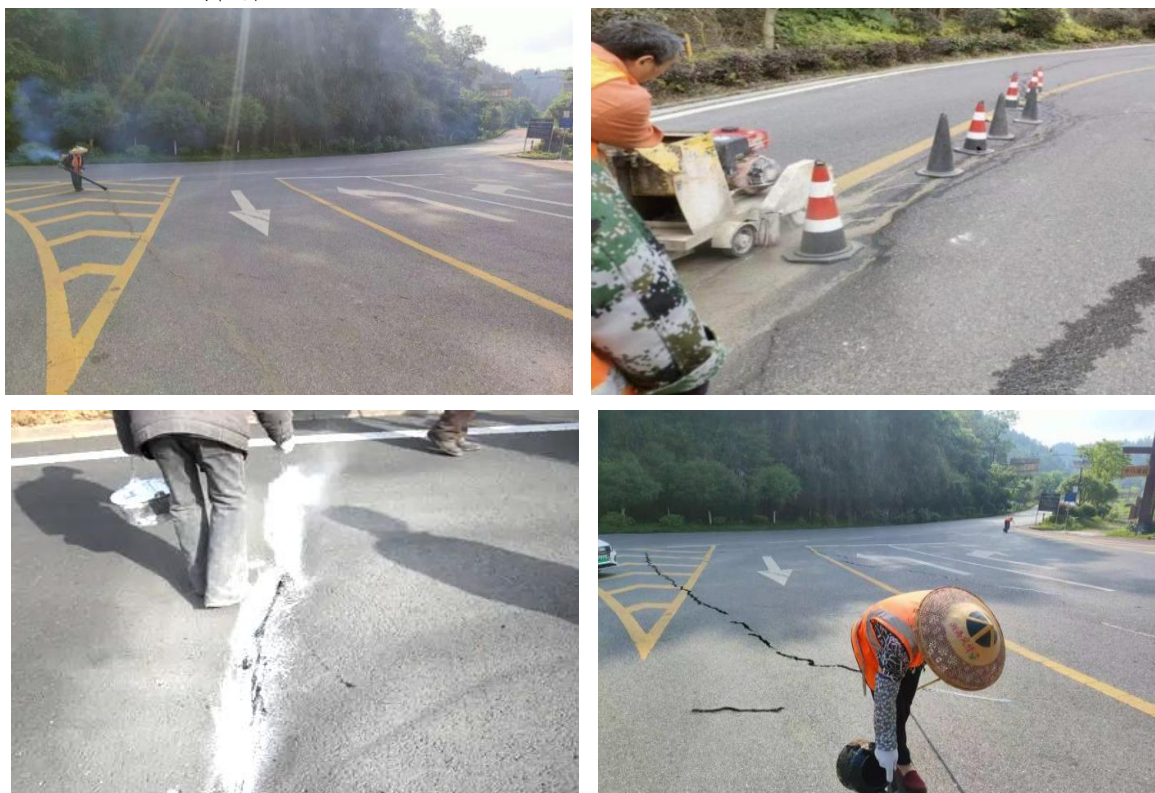


图 1、2、3、4 施工现场及工艺流程

（1）裂缝开槽：使用手持开槽机沿裂缝走向开出规则槽口，去除裂缝边缘松散、老化部分，形成新的、稳固的粘结面；提供容纳热熔胶的空间，确保有效填缝深度。（如图 1 所示）

（2）槽内清理与干燥：工人使用高压吹风机彻底吹净槽内、槽口、及周边区域的灰尘；高压气体彻底清洁是关键步骤，确保槽体及周边绝对干燥、洁净，是保证灌缝胶与旧沥青砼粘结牢固的基础。（如图 2 所示）

（3）槽内灌缝：工人使用灌缝壶或挤压枪，将选用的热熔胶匀速、连续地灌注到清洁干燥的槽内；控制灌注量，匀速灌胶，填满整个槽体，

使胶面略高于原路面形成微小拱起（约 1-3mm），或使用刮板刮平至略低于路面（约 0-2mm）；灌注量控制原则：保证热熔胶能充分接触槽壁并形成有效密封，避免过度灌注造成浪费和行车不适。（如图 3 所示）

（4）表面整形与养护：灌注完成（或整形后）的热熔胶表面均匀撒上薄层滑石粉或干净细砂，防止开放交通初期粘结车轮带走热熔胶，尤其是在气温较高时应特别注意。（如图 4 所示）

三、工程应用情况

在湖南省湘西州花垣县双龙镇十八洞村 Y021 线日常养护中，对全线筛选出的宽度在 5-12mm、需有效防水的裂缝进行处置，总计应用长度约 2240 米（涉及裂缝约 80 条）。经现场观测，裂缝渗水现象得到有效遏制，路面技术状况得到进一步改善。

四、成本造价

本技术通过小型设备共享，工艺系统化，使其性价比提高，以可控的成本实现了较好的深层防水密封效果，有效延长路面使用寿命，减少水损害引发的更大维修费用（比如沥青砼路面挖补等费用更高），成为雨水较多和山区农村公路裂缝处置性价比最高的措施。

五、应用效果

施工质量：使用规范的开槽和清理为热熔胶提供了良好的粘结基面，开槽后填充热熔胶，能有效封闭裂缝，阻止雨水沿裂缝下渗至基层；保护路面结构，减少路面水损害风险，同时提升平整度。

应用效果：有效阻止地表水侵入路面基层和路基，预防水损；早期裂缝进行及时、有效的密封，能显著延缓裂缝扩展和周边路面损坏速度，延长路面使用寿命。

水泥砼桥面（含伸缩缝）快速修复技术

广西壮族自治区大新县交通运输局

一、适用场景

主要适用于砼桥伸缩缝（含桥面）混凝土局部破损、剥落（深度 3-15cm）或结构性损坏修复。在严苛环境下，通过超早强特性（4-6 小时强度达 30MPa 以上）实现 12-24 小时快速开放交通，大幅减少交通中断，尤其适合交通繁忙的城市高架、重载干线以及软土沉降区桥梁、水泥路面等应急抢险，实现砼桥面（含伸缩缝）“快修快通”目标。

二、施工工况及工艺流程

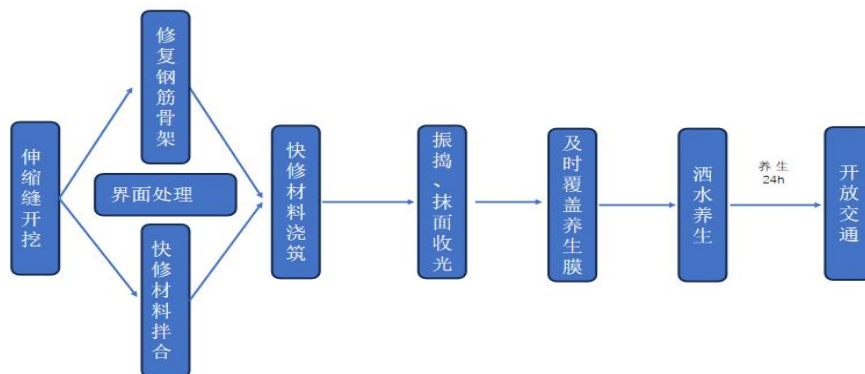


图 1 工艺流程

（一）划线开槽

确定破损范围，清理碎渣并填塞泡沫板防止混凝土渗入伸缩缝功能槽。

（二）焊接钢筋骨架

采用 U/L/S 型钢筋加固预埋筋与钢梁锚固筋，无预埋筋时植筋焊接。



图 2 焊接钢筋

（三）界面处理

钢筋骨架加固焊接完成后，用强力吹风机清洁槽口，采用高压水枪或其他设备冲洗，清除槽口内浮土和杂物并保持湿润。



图 3 界面处理

（四）混合料拌和与浇筑

按修复尺寸计算材料用量，根据配合比准确称量各材料。为保障修补料拌合均匀，建议采用强制搅拌机进行搅拌加工。



图 4 现场混合料拌和

（五）抹面收光养生

初凝前完成抹面收光，覆盖塑料薄膜养护，开放交通时间不宜低于24小时。



图5 抹面收光

三、工程应用情况

崇左市大新县龙门中桥出现伸缩缝错台、桥面板网裂坑槽的复合病害，严重影响物流通道安全。项目采用砼桥面（含伸缩缝）快速修复技术对伸缩缝、桥面板进行修复。施工过程实施“分车道错时”作业，实现交通“零中断”。

修复后伸缩缝位移功能恢复率 100%，桥面板承载力提升至原设计 1.8 倍，24 小时即开放重载交通。该案例成为高温重载走廊“快速修复+长效增强”的标杆，为同类工业物流桥梁提供技术范式。



图6 现场应用

四、成本造价

通过对比水泥砼桥面（含伸缩缝）快速修复技术与传统普通水泥修补技术，快速修复技术可实现快速开放交通、显著延长服役寿命，其综合成本降低约 2.5%，社会效益显著，并具有一定的经济效益。

表 1 快速修复与传统修补技术对比

对比项目	传统修补材料	快速修复材料	效益对比
凝结时间	初凝时间 $\geq 6\text{h}$; 终凝时间 $\geq 10\text{h}$	可控，最快 6h 开放交通	缩短水化反应时间
抗折强度	$28\text{d} \geq 6.0\text{MPa}$	$6\text{h} \geq 5.0\text{MPa}$	提升力学性能
抗压强度	$28\text{d} \geq 30.0\text{MPa}$	$6\text{h} \geq 50\text{MPa}$ $28\text{d} \geq 70\text{MPa}$	提升力学性能
28d 收缩（膨胀率）	$\leq 0.1\%$	$\leq 60.6 \times 10^{-6}$	提升耐久性
拉拔粘结强度	$14\text{d} \geq 1.0\text{MPa}$	$24\text{h} \geq 1.3\text{MPa}$	提升力学性能
恢复交通时间	7d 以上	12-24h	快速开放交通
预期服役寿命	2 年以内	5 年以上	延长服役寿命

五、应用效果

项目修复前，采用普通混凝土修复技术，受交通封闭时间长限制，施工方案选择受限，且修复后的伸缩缝在早期强度发展、抗冲击韧性方面表现不佳。采用快速修复技术后，有效解决了交通快速恢复的难题，并在早期强度、耐久性及行车舒适性方面取得显著成效。

结合通车后的跟踪调查结果显示，采用快速修复技术处理的伸缩缝，未出现早期碎裂、脱空、渗漏及锚固区混凝土破损等常见病害，整体路况维持优良，显著降低了后续维护需求。

沥青冷补料工艺在经济型养护中的应用

四川省长宁县交通运输局

一、适用场景

1、公路类型：交通量中低水平、路基基本稳定的县道、乡道、村道沥青路面。

2、病害特征：中小型分散型坑槽（ $1\text{cm} \leq \text{深度} \leq 5\text{cm}$ ）、局部网裂、松散，无严重结构性破坏。

3、环境条件：四季皆宜，尤其适用于低温、雨季等无法采用热拌沥青混合料的季节或应急抢修。山区等较为偏远地区设备进场困难路段优势显著。

4、资源限制：适用于缺乏大型拌合站、热修补设备及专业施工队伍的基层养护单位。

二、施工工况及工艺流程

（一）核心材料：袋装沥青冷补料（工厂预拌、开袋即用、储存期长）。

（二）主要设备：小型运输车、铁锹、洋镐、扫帚、吹风机（或手推式路面清扫机）、小型压路机（或平板夯、轮胎夯），人工夯实工具（如铁锹背）。

（三）工艺流程（“设、切、清、涂、填、夯、通”七步法）：

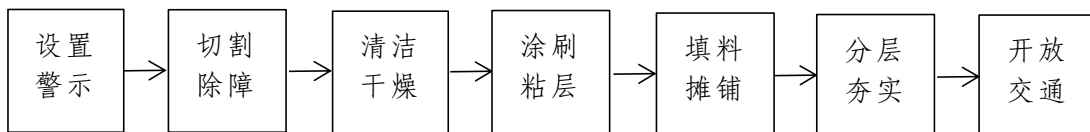


图 1 工艺流程图

1、设置警示：设置简易警示标志。

2、切割除障：用切割机或洋镐沿坑槽边缘切割出规则形态（矩形或方形）且垂直的修补边界（深至坚实基层），彻底清除坑槽内及周边松散的碎石、泥土和积水。

3、清洁干燥：用扫帚、吹风机等工具将切割后的坑槽彻底清扫干净，确保底面及侧壁干燥、无尘、无杂物，这是粘结牢固的关键。

4、涂刷粘层（可选但推荐）：在清洁干燥的坑槽底面和侧壁均匀涂刷一层乳化沥青或专用冷补粘层油（用量约 $0.3-0.5\text{kg/m}^2$ ），增强新旧材料粘结力。

5、填料摊铺：将冷补料倒入坑槽，虚铺厚度应高出原路面约 1.5-2 厘米（考虑压实系数），用铁锹初步整平。



图 2 填料摊铺施工现场

6、分层夯实：

初压：人工用铁锹背初步拍实。

主压：采用小型压路机、平板机或轮胎夯进行充分压实，尤其注重边缘接缝处。压实时应从边缘向中心进行。要求压实后修补面略高于原路面（约 3-5mm）以预留行车进一步压实空间。



图 3 填料摊铺后整平初压



图 4 人工初压后平板机主压

7、开放交通：清除修补区域周边散落的废料，清扫路面。压实完成后，可立即开放交通（初期车辆应低速通过）。

三、工程应用情况

长宁县境内县道 X033 龙周路、县道 X403 长大路等农村公路路面出现多处分散性坑槽，最大尺寸约 80cm*160cm，深约 2-4cm，影响行车安全及舒适性，通过组织 5 名经过简单培训的养护工人实施，采用上述“七步法”工艺，单个中等坑槽（约 0.5m²）处理时间（含清理、切割、修补、压实）约 30-45 分钟，团队单日可有效修补坑槽 10-15 处（视坑槽大小及分布）。

四、成本造价

冷补料快速修复技术在农村公路坑槽修补中展现出显著的经济优势，其成本显著低于传统的热拌沥青混合料修补工艺，传统热补工艺（尤其是小规模修补）由于需要启动大型拌合站、加热设备、摊铺压实机械，并涉及材料运输、保温、交通管制等多环节高成本，相比之下，冷补料技术可节省养护成本约 40%-60%，经济效益极其显著。具体体现在以下几个方面：

1、材料即用免加热：省去了庞大的燃料加热成本，这是热补工艺的最大开销之一。

2、设备投入极低：无需昂贵的热拌站、沥青罐车、摊铺机、大型压路机等重型设备，主要依赖小型、廉价、易得的手持或轻型机具（如切割机、吹风机、平板夯），大大降低了设备购置、租赁和维护费用。

3、人工效率与成本：施工工艺简单，对工人技术要求不高，经短暂培训的普通养护工即可胜任，人工费用相对较低，且组织灵活。

4、无废料损耗：袋装冷补料按需取用，剩余材料可长期密封储存下次使用，避免了热拌料因温度下降或施工延误造成的浪费。

5、即时开放交通：修补后无需养生等待，立即通车，极大减少了交通管制的时间和人力成本，降低了因施工中断带来的社会成本。

6、管理成本低：施工组织简单，无需复杂的协调和大型项目管理投入。

五、应用效果

沥青冷补料快速修复技术，凭借其材料易得、工艺简单、无需加热、即时开放交通、成本低廉的核心优势，完美契合了长宁县农村公路“点多、线长、面广、资金紧、技术弱”的养护现实。在交通量适中、修补工艺到位（尤其清洁干燥和压实）的情况下，修补处可保持良好状态 1-2 年，满足农村公路中短期养护需求，关键接缝处粘结牢固，不易脱落。该技术在农村公路中小坑槽修补领域具有极高的经济性、实用性和可推广性，是提升农村公路日常养护及时性与有效性、保障“四好农村路”安全畅通的优选解决方案。

沥青路面坑槽冷补技术

贵州省黔南布依族苗族自治州交通建设养护发展中心

一、适用场景

沥青路面坑槽冷补技术是采用一种无需加热即可施工的路面修补材料，具有施工便捷，无需加热设备，不受温度限制，材料储存方便等特点。

适用于农村公路日常养护中路面坑槽修复，尤其在低温、潮湿环境（如南方多雨季节、北方春秋季节低温时段）及丘陵、平原等各类地形地质区域，可快速填补修复，缩短保养时间，快速开放交通，同时利于降低小面积、低等级公路养护投入成本。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料、设备与人员

1、材料：采用专用冷补沥青混合料，无需加热，具备良好的粘结性、抗水性，骨料级配合理。

2、设备：小型铣刨机（清理坑槽松散部分）、手持式吹风机（吹净灰尘杂物）、压实工具（如小型振动夯、小型压路机，电镐、条件受限时可用人工夯具）。

3、人员：施工员 1 名（统筹施工）、操作手 2 名（操作设备）、辅助工 2 名（协助清理、摊铺混合料）。

（二）工艺流程

1、坑槽清理：用铣刨机铣刨或者电镐凿除坑槽及周边松散、破损沥青层，使坑槽壁垂直、底部平整；再用吹风机将坑槽内灰尘、碎屑彻底吹净，保证干燥清洁。



图 1 划定坑槽范围



图 2 切割



图 3 凿除坑槽及周边松散沥青



图 4 坑槽干燥清洁

2、摊铺冷补料：先乳化沥青涂抹坑槽边缘，使冷补料和原沥青结构层紧密结合补透水，再将冷补沥青混合料倒入坑槽，高出原路面 1-2cm，摊铺均匀，使混合料与坑槽壁紧密贴合。



图 5 乳化沥青涂抹坑槽边缘



图 6 摊铺冷补沥青混合料

3、压实作业：先用小型振动夯对抗槽边缘及中部逐步压实，再用轮胎压路机静压 2 遍（无压路机时，人工夯具反复夯实），确保冷补料与原路面平顺衔接。



图 7 逐步压实冷补料



图 8 冷补料与原路面平顺衔接

三、工程应用情况

黔南布依族苗族自治州气候类型主要为亚热带湿润季风气候，降水充

沛，年降水量较多且分布均匀，湿度较大，典型的山地高原地形，加之载重车辆较多，易造成行车道出现坑槽。

冷补料作为一种无需加热即可施工的路面修补材料，在坑槽修补工程中应用广泛，2024 年以来已在黔南州黔南州都匀市、荔波县、三都、独山农村公路养护中多处坑槽处治应用，其总体应用情况可从以下几个方面概括：

（一）核心应用场景

1、应急修补：适用于突发路面坑槽（如暴雨、车辆碾压导致的破损），可快速填补，保障交通通行，尤其在低温、雨雪等不利天气下优势显著，无需等待天气转好即可施工。

2、日常养护：在城市公路、农村公路、高速公路的日常小面积坑槽修补中频繁使用，能及时修复小型破损，延缓路面病害扩大。

3、临时修补过渡：对于计划大规模维修的路段，可先用冷补料临时填补坑槽，维持路面基本功能，为后续大修争取时间。

（二）应用优势

1、施工便捷：无需加热设备，直接摊铺、压实即可，节省设备和人力成本，施工效率高，单坑槽修补时间短，对交通影响小。

2、适应性强：不受温度限制， -30°C 至 50°C 均可施工，且能适应潮湿基层（少量积水或湿润状态下也可使用）。

3、存储稳定：未用完的冷补料可密封保存，再次使用性能基本不受影响，减少材料浪费。

总体而言，冷补料在坑槽修补中是一种高效、灵活的材料，尤其在应急和特殊环境下不可或缺，是路面养护体系中重要的补充手段。

四、成本造价

相比热补工艺需加热设备、大量施工员、机械设备、和受温度影响和限制，冷补技术设备简单、储存方便、施工灵活，单坑槽处治较乳化沥青修补、热拌沥青修补等传统使用的成本降低约 30%，且可及时处置病害，避免坑槽扩大增加后期成本，适合农村公路分散、应急养护需求等。

传统工艺1 (乳化沥青修补)	传统工艺2 (热拌沥青修补)	新工艺 (冷补料修补)	效益对比
使用时间3个月	使用时间3年	使用时间3年	返修时间长
施工条件苛刻	施工条件苛刻	施工条件简单	任何气候条件的 能施工
施工技术繁琐	施工技术繁琐	施工技术简单	节约人工成本
剩余材料不能回收	剩余材料不能回收	剩余材料能回收	节约材料成本
机械使用多	机械使用多	机械使用少	节约机械成本

五、应用效果

(一) 施工质量

冷补料与原路面粘结牢固，经 3 个月观测，无脱落、松散，坑槽修补处平整度达标。

(二) 应用效果

有效恢复路面通行功能，减少车辆颠簸、跳车现象，提升农村公路行车舒适性与安全性；施工快速单坑槽 30 分钟左右完成，对交通干扰小，适合农村公路日常小修保养，推广价值高。



图 9 冷补料修补在黔南州多条农村公路小修中应用

路面坑槽冷补修复工艺养护技术

新疆生产建设兵团第三师图木舒克市交通运输局

一、适用场景

（一）适用的环境场景

1、适用于多数环境条件，包括不同的气候区域，无论是在春季，还是炎热夏季，冷补材料都能发挥其修补功效，不同于热拌沥青受温度、场地、运输距离的限制，材料齐全随用随拌。

2、该工艺适用于各等级公路、机场跑公路面破损坑槽及车辙痕迹的修补和养护，市政街公路面破损坑槽、挖掘坑洞，地下管线铺设后的路面修复、桥梁伸缩缝、重载路桥结合部、车流量大的公路弯道及特殊路面修补。

（二）地形地质类型

适用于各种地形地质条件公路，如山区的崎岖路段、丘陵地带以及平原地区公路，热拌沥青运输距离较长难以保证施工质量的偏远路段。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工所需材料要求

1、冷补剂：选择质量可靠、与公路路面适配性好的冷补剂产品。冷补剂应具备良好的粘结性、柔韧性和耐久性，能够在不同温度下保持稳定性能。

2、骨料：相应配合比的沥青面层砂石料等。

3、其他辅助材料：如必要的添加剂，以调整冷补剂的工作性能，确保施工效果。

（二）设备类型

1、切割设备：小型的切割机或是铣刨机等，用于坑槽、盐胀、车辙等路段的面层切除或铣刨公路面层。

2、清扫设备：小型清扫车或扫帚，用于清理坑槽内的杂物和灰尘，保证修补区域清洁。

3、搅拌设备：小型搅拌机，用于将冷补剂充分搅拌均匀，确保材料性能一致。

4、压实设备：小型振动平板夯或手动压实工具，用于压实修补后的冷补材料，使其与原路面紧密结合。

（三）人员分工

1、施工负责人：负责整个施工过程的组织、协调交通管制和质量控制，确保施工按计划进行。

2、清扫人员：负责清理坑槽周边路面，为施工创造良好条件。

3、搅拌操作人员：操作搅拌机控制冷补剂的拌和比例和时间。

4、摊铺及压实人员：将搅拌好的冷补剂摊铺到坑槽内，并进行压实作业。

（四）施工流程

1、施工准备：封闭交通，摆放隔离墩、安全指示标牌，检查机器设备，确保能正常运行，确定施工工具齐全。

2、切割开槽：按照“圆洞方补，斜洞正补”的原则，在坑槽周围划出大小适中的轮廓线，每边至少延伸至完好路面 5cm（挖去路面松散、破碎的旧料直至坚实部分）。开槽时，用切割机沿轮廓线切槽，并用动力镐或者铣刨机开挖。要求成型的坑槽壁面应尽可能保持和路面垂直，坑槽底部坚实、平整。

3、坑槽清理：用铁刷和吹风机将坑槽四壁面和底面的松散颗粒、灰尘和其他残留物清理干净，槽内不得有泥浆等杂物，废渣的清除要见到固体坚固面为止，并在坑槽内部均匀涂刷粘层油，保证修补料与原路面粘结牢固。

4、材料搅拌：按照冷补剂产品说明书的要求，将冷补剂倒入小型搅拌机中搅拌均匀，搅拌时间一般为 3-5 分钟，以确保冷补剂的性能均匀一致。

5、坑槽填补：将搅拌好的冷补料摊铺到坑槽内，直到填料高出坑槽为宜。估算修补料投入量高度应略高于原路面，以便后续压实。

6、压实作业：铺设均匀后，根据修补面积大小和深度，选择适当的压实工具和方法进行压实，通常压实度应达到 93%以上。如果坑槽深度大于 6cm，则应按照 3-6cm 为一层，分层填补，使用小型振动平板夯或手动压实工具对摊铺好的冷补剂进行逐层压实，压实过程中要注意从坑槽边缘向中心逐步压实，确保冷补材料与原路面紧密结合，压实次数一般为 3-5 遍，直至冷补材料表面平整、密实。

7、开放交通：修补完的坑槽表面应光洁、平整、无轮迹，坑槽四周和边角压实良好、无松散等现象。摊铺合格可立即开放交通，无需养护或者限制通行车辆的载重。

施工流程图：

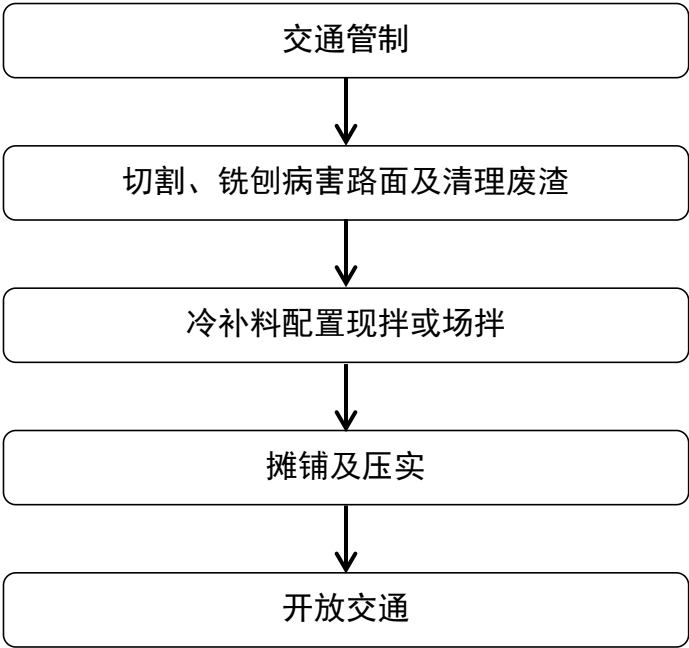




图 1 现场作业图

三、工程应用情况

在第三师公路养护中，路面坑槽冷补修复工艺应用效果良好，该工艺操作简便，能快速填补坑槽。材料具有良好的粘结性和柔韧性，与原有路面结合紧密，施工不受天气限制，可随时作业，经实际应用修复后的路面平整度显著提升，行车舒适性增强，有效延长了路面使用寿命，降低了养护成本。

四、成本造价

（一）材料及设备成本

材料成本：冷补材料性能优良，能适应多种环境，虽单价有差异，但总体适中。

人工成本：操作简便，施工人员易掌握，人工费相对合理。

设备成本：无需大型设备，小型工具即可，降低设备投入。

时间成本：施工快速，可即时通车，减少交通阻断时间成本。

综合成本：综合来看，该工艺成本优势明显。材料耐用减少重复修补，人工和设备投入低，时间成本降低，在第三师公路养护中性价比高，能有效保障公路畅通，提升养护效益。

（二）经济性分析

与传统的热拌沥青修补方法相比，冷补剂修补技术具有明显的便携性，针对偏远公路具有一定的经济性，如第三师叶城二牧场等崎岖公路。热拌沥青修补需要专门的加热设备和运输车辆，施工过程较为复杂，成本较高。而冷补剂修补技术无需加热，施工设备简单，施工过程相对便捷，大大降低了施工成本。同时，冷补剂修补后的路面能够快速开放交通，减少了对农村公路交通的影响，间接带来了一定的经济效益。

五、应用效果

（一）施工质量

1、采用冷补剂修补的农村公路路面坑槽，施工质量良好。修补后的路面与原路面粘结牢固，无明显的脱层、起皮现象。

2、路面平整度得到显著改善，修补后的坑槽处平整度偏差符合相关标准要求，行车舒适性大大提高。

3、经过一段时间的车辆行驶碾压，修补部位未出现明显的变形或损坏，表明冷补材料具有较好的压实性能和抗车辙能力。

（二）应用效果

1、修补后的农村公路路面坑槽病害得到有效治理，恢复了路面的使用功能，保障了农村地区的交通安全。

2、冷补剂修补技术施工速度快，能够在较短时间内完成路面坑槽的修补工作，减少了对农村公路交通的干扰，提高了公路的通行效率。

3、该技术的应用提高了农村公路的整体路况水平，提升了农村地区的交通形象，对促进农村经济发展和社会交流起到了积极作用。

4、冷补剂修补后的路面在耐久性方面表现出色，经过多个季节的考验，修补部位依然保持良好的性能，有效延长了农村公路的使用寿命，降低了养护成本。

第二篇 经济实用类

二灰基层处理技术在农村公路养护工程中的应用

北京市交通委员会密云公路分局

一、适用场景

地下水位较高，且冬季降雪量大、气温较低，出现较为严重的翻浆现象，路面出现大量鼓起、网裂、车辙等情况，严重影响行车安全和公路通行能力的公路。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料准备

基层换填材料：石灰粉煤灰稳定碎石，确保材料质量符合设计要求，石灰应符合Ⅲ级以上标准，水泥应选用普通硅酸盐水泥且强度等级不低于42.5级。修补路面材料：根据路面损坏情况，准备好热拌沥青混凝土（AC-13）。

（二）机械设备准备

配备合适的挖掘设备，60 挖掘机或装载机，用于翻浆部位的挖掘。

十轮运输车，保证施工材料的及时运输。压实设备，土方压路机、13T 双钢轮压路机，4T 双钢轮压路机等，用于基层和路面的压实。

（三）现场勘查与测量

对翻浆路段进行详细勘查，确定翻浆的范围、严重程度以及地下水位等情况。使用水准仪精确测量翻浆部位的尺寸和高程，为后续施工提供准确数据。

（四）病害挖除

用挖掘机或人工将翻浆严重的沥青混凝土面层及部分基层挖除。挖除深度应根据翻浆情况而定，一般要挖到基层稳定、无翻浆现象的部位，深度通常在 30-50cm 左右。将挖出的材料运离施工现场，妥善处理，避免对周边环境造成污染。

（五）分层回填与压实

将拌合好的石灰粉煤灰稳定碎石分层回填到挖除部位，厚度为 18cm。

采用土方压路机进行压实，压实度应符合设计要求。石灰粉煤灰稳定碎石基层的压实度应达到 95%以上每层压实后要进行质量检测。

（六）基层平整

对换填好的基层进行平整，使其表面平整度符合要求。采用平地机或人工配合进行平整，用 3m 直尺检测平整度，局部不平整处要进行填补或铲除处理，确保基层表面平整误差不超过规定值。

（七）路面铺筑

采用热拌沥青混凝土（AC-13）修复路面，将热拌沥青混凝土运至施工现场，用摊铺机进行摊铺。摊铺过程中要控制好摊铺速度、摊铺厚度和平整度，摊铺厚度为 4cm。

采用振动压路机进行压实，压实顺序为先静压 1-2 遍，然后振动压实 4-6 遍，最后再静压 1-2 遍，直至路面压实度符合设计标准。

三、成本造价

从长期来看，对翻浆病害进行彻底处理，如采用水泥稳定砂砾基层换填和热拌沥青混凝土路面修复，虽然初期投资较大，但能显著提高路面的使用寿命和性能，减少后期维修成本。良好的路面状况可降低车辆的运营成本，提高运输效率，促进乡村经济发展。

四、应用效果

（一）施工质量-强度与稳定性

经过合理设计和施工的二灰处理路面基层具有较高的强度和稳定性。其无侧限抗压强度能够满足不同等级公路的设计要求，一般可达到 0.8-1.5MPa 甚至更高，能够承受车辆荷载的反复作用，减少路面的变形和破坏。

二灰稳定土基层的水稳定性较好，在潮湿环境下，其强度损失较小。这是因为石灰和粉煤灰与土发生化学反应，生成具有胶凝性的物质，填充了土颗粒间的孔隙，提高了基层的密实度和抗渗性，有效防止了水分对基层的侵蚀，从而保证了路面的长期稳定性。

（二）经济效益

从经济效益角度来看，二灰处理路面基层具有一定优势。一方面，石灰和粉煤灰通常是工业废料，将其应用于公路基层，实现了资源的再利用，降低了工程造价。另一方面，由于二灰基层的耐久性较好，减少了路面的维修次数和维修成本，间接为公路使用者节省了费用。同时，良好的路面状况有利于提高公路的通行能力，促进地区经济发展。

基于高强度半柔性工法的农村公路耐久性提升路径

上海市金山区交通委员会

一、适用场景

高强度半柔性工法（即灌注式半柔性路面技术）是一种结合沥青柔性及水泥刚性的复合路面工艺。传统沥青路面在重载、高温环境下易出现车辙、裂缝等病害，水泥路面舒适性较差、修复周期长，而高强度半柔性工法通过在大空隙沥青混合料基体中灌注高性能水泥基浆形成“刚柔并济”的结构。其核心优势在于抗车辙性、耐久性，特别适用于高负荷、易变形路段。主要应用场景包括：公路交叉口（车辆频繁启停和转弯，路面易产生车辙）、公交站台和 BRT 专用道（公交车频繁启停，路面易损坏）、高速公路匝道和桥梁（坡度大、车辆刹车频繁，路面易产生车辙）、工业园区和港口区域公路（重载车辆多，路面易产生车辙）、特殊气候区域公路（高温多雨地区，由于高温导致沥青路面更易变形，雨水下渗后伴随车辆行驶形成水压，使沥青剥落，形成坑塘等病害）。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工工况

- 1、施工材料：高强度半柔性路面包括大孔隙改性沥青混合料（孔隙率 25%左右）、高性能快硬水泥基浆（抗压 60MPa 以上、抗折 8MPa 以上）。
- 2、施工设备：包括铣刨机、清扫机、喷洒车、压路机、灌浆设备等。
- 3、施工人员：摊铺班组 14 人左右；灌浆班组 10 人左右。



图 1 铣刨机



图 2 路面清扫



图 3 粘层油喷洒车



图 4 沥青摊铺



图 5 双钢轮非振动压路机



图 6 灌浆设备

(二) 工艺流程

- 1、原路面铣刨 4-6cm 上面层。
- 2、清理清扫至干燥洁净。
- 3、均匀适量洒布 SBR 改性乳化沥青粘层油。
- 4、摊铺大空隙率开级配沥青混凝土并压实。
- 5、边角密封处理。
- 6、灌浆施工。
- 7、围护养护 3h。
- 8、3h 后开放交通。



图 7 灌浆施工

三、工程应用情况

金山毗邻浙江，交通运输频繁，此外金山工业园区较多，大型运输车辆来往不断，具有显著的交通流量大、重载车辆多的交通特征，导致部分路段特别是高速出入口段和一些农村公路十字路口段易出现车辙、拥包、裂缝等病害，较严重路段车辙深度可达 3-6cm，影响交通安全与公路美观。

针对经常损坏、影响市民出行的路段，金山区每年进行调研和统计，同时根据路况检测报告，合理安排下年度农村公路养护维修项目计划，在相关路口段采用高强度半柔性工法修复。如漕廊公路（路线编号：X249310116）车流量较大，多个十字路口出现车辙，2020 年开始对多个路口进行改造，到目前为止已修复 6 个路口约 7500m²，目前仍在运行，状态良好。此外对沪杭公路、金廊公路、金山工业区大道等重车较多的路口进行了维修，约 8 个路口 11000m²，目前均未进行过二次维修，状态良好。

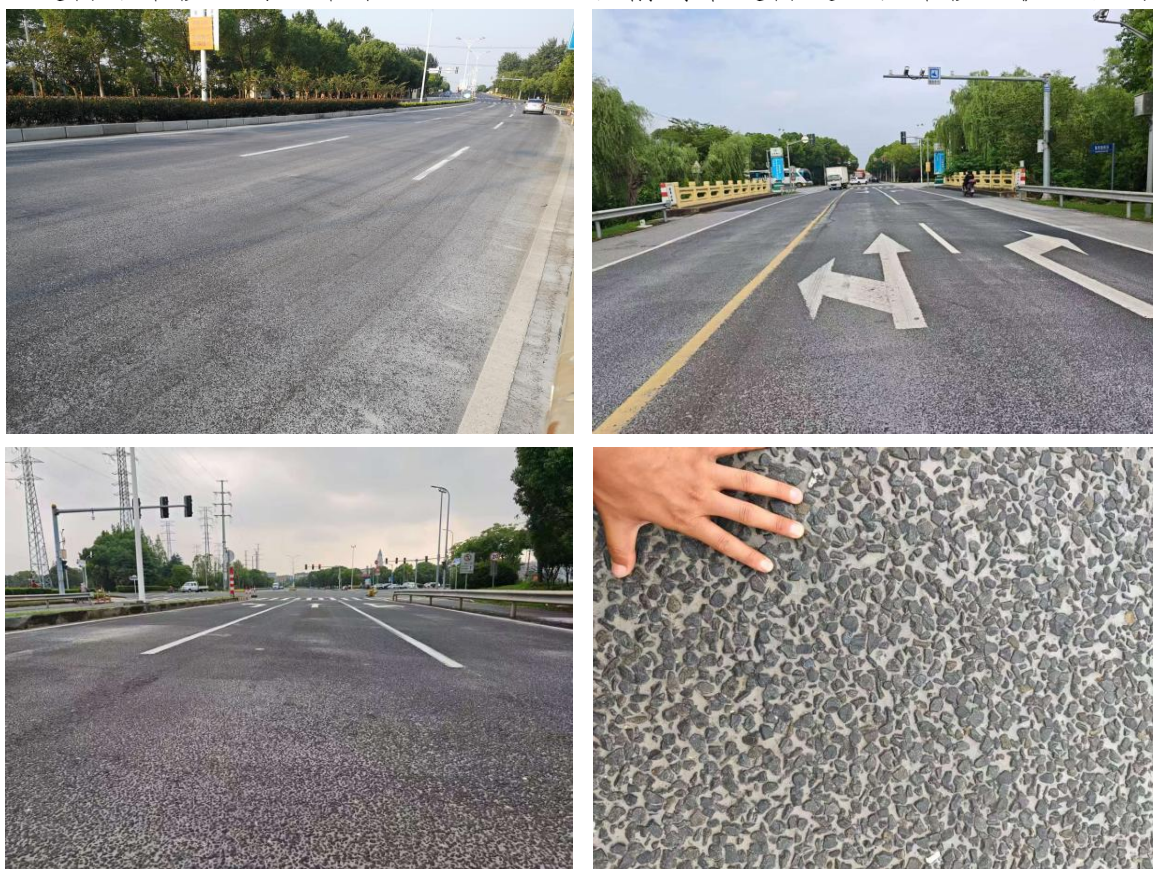


图 8 漕廊公路等路口应用实景

四、成本造价

通过对比适用场景下普通沥青混凝土路面和加抗车辙剂路面，高强度半柔性工法综合效益显著，每5年生命周期成本分别可降低约58%和12.5%。

表1 高强度半柔性工法与传统沥青路面成本效益对比

对比	传统方案1： 普通沥青混凝土	传统方案2： 加抗车辙剂路面	新方案： 高强度半柔性工法	效益 对比
典型结构	现有路面结构铣刨摊铺普通沥青混凝土	现有路面结构铣刨摊铺加抗车辙剂沥青混凝土	现有路面结构铣刨摊铺大孔隙沥青混凝土并灌浆	—
使用年限	使用年限1年	使用年限2.5年	使用年限≥5年	提高100%以上
每5年生命周期成本	一次维修成本造价假定为1,5年周期性成本为5	一次维修成本造价为1.2, 5年周期性成本为2.4	一次维修成本造价为2.1, 5年周期性成本为2.1	比传统方案1降低58%，比传统2降低12.5%

五、应用效果

高强度半柔性路面技术通过融合沥青的柔性与水泥的刚性，为农村公路耐久性提供了创新解决方案。抗车辙性能方面，半柔性路面的动稳定度可达50000次/mm，是普通沥青路面的10倍以上，在漕廊公路十字路口应用后保持5年无车辙。耐久性与经济效益方面，使用寿命可达5-10年，全生命周期成本降低12.5%-58%，2020年起相关路口实施后均未二次维修。环保效益方面，减少沥青用量30%-50%，降低拌和与摊铺能耗。

高强半柔性工法通过材料创新与工艺精细化，实现了农村公路“强基耐久、降本增效”的核心目标。未来需进一步推动区域标准化施工，为“四好农村路”建设高质量发展提供技术支撑，为乡村振兴注入“交通韧性”新动能。

低等级公路“全再生”材料修复技术

上海市奉贤区交通委员会

一、适用场景

低等级公路“全再生”材料修复是指将公路修复产生的各类固体废弃物进行再生后，分别用于公路底基层、基层、面层的全断面修复技术，具有节能环保、减少碳排放量、有效降低公路维修成本的特点。

适用于各类低等级公路，包括二级及以下公路、次干路及以下城市公路的路基、路面病害的大面积修复，对于需对基层进行翻挖修复的尤为适用，可有效减少公路修复中产生的各类固体废弃物处置量，极大地提高废旧材料的回收利用率。

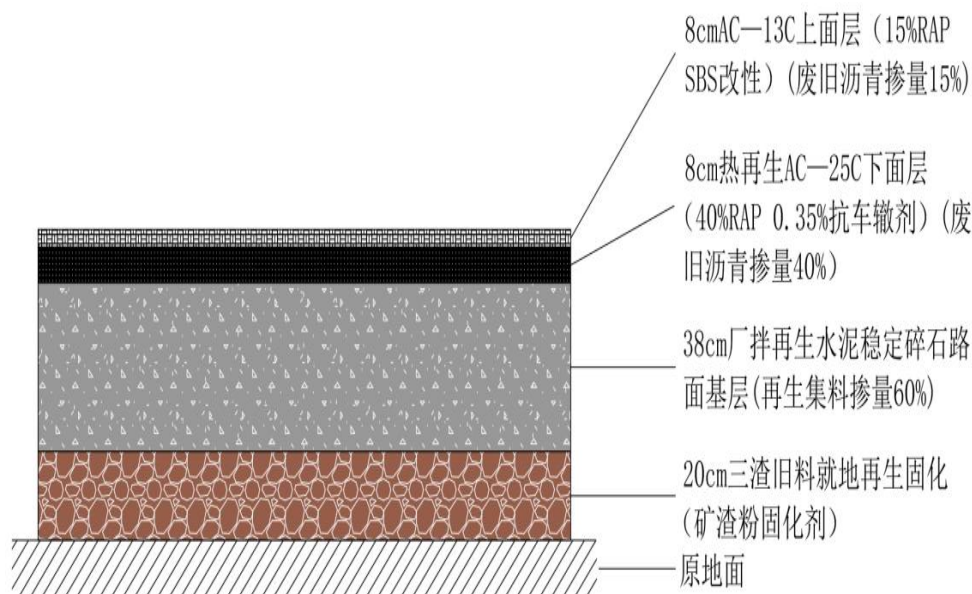


图 1 公路全再生修复断面结构（以二级公路为例）

二、施工工况及工艺流程

（一）再生集料要求

1、再生集料来源

公路改扩建、修复工程过程中产生的废水泥稳定碎石、废侧平石、废道板砖、废混凝土路面、废沥青混凝土等公路与市政工程固废，经破碎、筛分加工形成 5-15mm、15-31.5mm、0-5mm 三种规格再生集料。



图 2 再生细集料 (0-5mm)



图 3 再生粗集料 (RCA-2) (15-31.5mm)



图 4 再生粗集料 (RCA-1) (5-15mm)

2、再生集料性能要求

通过对再生集料进行材性分析，并结合再生公路基层材料性能研究，总结出再生集料用于再生公路基层材料时需满足的技术指标要求。

(1) 被污染或腐蚀的建筑垃圾不得用于制备再生集料；

(2) 再生集料的规格宜符合现行行业标准《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20-2015) 的规定。

(3) 再生集料的性能应符合下表要求，试验方法应按现行行业标准《公路工程集料试验规程》(JTG E42-2005) 的规定执行。

表 1 再生集料技术要求表

项目		集料等级	
		I	II
再生粗集料	压碎值/%	≤30	≤35
	针片状颗粒含量/%	< 10	
	含泥量/%	< 1.0	< 2.0
	杂质含量/%	< 0.5	< 1.0

项 目			集料等级	
			I	II
再生细集料	压碎值/%		≤30	≤35
	泥块含量/%		< 2.0	< 3.0
	液限a/%		≤40	
	塑性指数a		≤17	
	有机质含量		合格	
再生集料	重金属浸出毒性 (mg/L)	汞（总汞）	≤0.02	
		铅（总铅）	≤2.0	
		砷（总砷）	≤0.6	
		镉（总镉）	≤0.1	
		铬（总铬）	≤1.5	

（二）工艺流程

1、结构设计

再生公路基层结构应根据公路类型、公路等级、交通荷载、路基条件、环境温湿度以及使用性能要求，进行整体设计，选择及组合与之相适应的公路路面结构。再生公路基层和底基层力学性能、水稳定性与耐久性应满足相关公路设计标准要求。

2、再生料生产

再生公路基层、面层材料应采用搅拌厂集中拌制，原材料应计量准确；再生公路基层材料中水泥、沥青用量应比室内试验确定的剂量适当增加；再生公路基层材料的外观质量应拌和均匀，无明显粗细料分离现象。

3、再生料施工

再生公路基层材料在潮湿路段施工时应采取措施，消除积水；基层施工期间的日最低气温应在 5℃ 以上，并在机具设备、施工技术管理等方面采取有效措施，做到及时摊铺、及时碾压、及时养生；再生公路基层材料应在最佳含水率状况下，采用专用摊铺机械摊铺；自搅拌至摊铺完成，不应超过 3h；摊铺好的混合料应采用重型压路机碾压至要求压实度；碾压完成后应立即保湿养生。常温下成活后应经 7d 养护，方可在其上铺筑面层，养生期间应封闭交通。



图 5 实施工艺流程

三、工程应用情况

从 2015 年提出设想，实施完成了沥青再生的研究应用，到 2019 年研究路用固废再生用于公路基层的应用，实施完成了以观工路为代表的三级公路的项目实例。2022 年研究团队在以往的工程实例和科研基础上，进行进一步优化和研究，于当年在航塘公路实施完成了“全再生”公路试验段。观工路与航塘公路的两个试验路段顺利通过了专家评审，各项检测指标均在符合规范要求，达到了理想的预期目标。对再生公路基层材料进行测试，城镇公路试验段、公路试验段基层压实度分别为 97.4%、97.9%，满足设计要求($\geq 97\%$)；城镇公路试验段再生水稳基层弯沉 19.2(0.01mm)，满足设计要求 (≤ 41.9 (0.01mm))，公路试验段再生水稳基层顶面弯沉 15.6 (0.01mm)，满足设计要求 (≤ 40.7 (0.01mm))；城市公路试验 57 段和公路试验段实测厚度分别为 372mm 和 367mm，符合设计要求 (平均值 $\geq 0.9H$ ， $H=38\text{cm}$)。



图 6 施工现场

四、成本造价

经统计，奉贤区各类公路修复在 2021 年共计使用沥青混凝土 46100 余吨、水泥稳定碎石 123000 余吨，产生的碳排放高达 5749 余吨，如“全再生”维修工艺全面推广，将减排 3000 余吨碳，有效控制本行业碳排放量；经成本测算分析，应用全再生公路修复技术，可节约工程造价成本约 15-20%。

五、应用效果

对路用固废材料回收加工生产再生料，用于公路养护、维修，不但能避免大量路用固废材料堆放、填埋造成的环境污染，还可替代天然砂石等建材，解决自然资源短缺及开发过程中的环境破坏问题，一举两得。通过“全再生”公路的推广应用，在不降低公路设施原有性能、不增加工程造价的基础上，实现全要素、全周期碳减排，从全碳链的角度推进公路设施可持续发展。

渗固磨耗层在农村公路养护工程中的应用

江苏省常州市武进区交通运输局

一、适用场景

渗固磨耗层在常州市武进区农村公路养护中的主要适用场景有：旧沥青路面铺设耐磨层、公路预防性养护施工。

（一）旧沥青路面铺设耐磨层

渗固磨耗层中，高性能微表处骨料被沥青网状结构紧密裹附，三者组成紧密的力学嵌锁体系，有效地限制了骨料因交通载荷可能产生的滑移脱落。在旧沥青路面上进行渗固磨耗层施工，有效地阻止了旧面层上的裂缝或路基裂缝反射到上面层，也可有效阻止上部应力裂缝与下部互联，延长了公路的使用年限。

（二）公路预防性养护施工

渗固磨耗层应用于公路养护时，可形成新的磨耗层。这样既有效地阻止了反射裂缝、水损害，大大改善了公路路面的性能，又可以节省成本。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工准备

施工准备阶段首先进行详细的路况调查，收集原路面结构强度、沥青老化程度、车辙、拥包及交通荷载等信息。随后，通过钻芯取样原路面表层 2cm 混合料，并在室内对回收的沥青测试其针入度、延度和软化点等老化指标。根据试验结果，确定能使老化沥青性能恢复约 80% 所需的渗固组分洒布量。为精准校准此用量，现场进行圆环试验：在路面画直径 15cm 的圆环，涂刷不同用量渗固组分，15 分钟后观察残液情况以调整确定最佳洒布量。最后，针对气候、交通及防水抗剪要求进行混合料配合比设计，通过拌和试验（确定可拌和时间）、粘聚力试验（控制开放交通时间）、湿轮磨耗试验（确定最小沥青用量）和负荷轮试验（限定油量上限防泛油）优化配比，以确保施工质量。

(二) 材料

主要采用的材料为渗固剂、集料、高聚物改性乳化沥青、水、稀浆混合料等。

1、渗固剂

渗固剂采用智能洒布车喷洒,可在原路面表面实现保质保量的均匀洒布,具有自然养生、破乳速度快的特点,可补充原路面老化沥青的轻质油分。同时可提供渗固磨耗层与原路面间的超强粘结,起到应力吸收和扩散作用,防止路面因应力集中而开裂。一般情况下,渗固剂喷洒量在 $0.3\sim 0.5\text{kg/m}^2$,实际喷洒量还要根据圆环试验及路况来确定。

2、高聚物改性乳化沥青

改性乳化沥青主要改性材料从国外进口,性能优越,同时因添加特殊材料,主要性能指标远超同类乳化沥青产品,具有极强的与石料裹附力、抗水毁能力和抗开裂能力。

3、稀浆混合料

根据室内试验验证和多年施工经验,调制出满足路况要求的骨料级配,待渗固剂养生完成后,现场与改性乳化沥青进行拌和,一次性摊铺于路面上,高效地形成一个整体网络结构,从而保证稀浆混合料具有更好的耐久性能。

(三) 设备的配置

渗固磨耗层必须采用专用机械施工,主要包括强力清刷机、铣刨机、集料级配筛分机、渗固剂智能洒布车、进口磨耗层摊铺机、矩形摊铺槽、装载机等。

(四) 施工工艺流程

施工工艺流程为:封闭交通→清洁路面→路面预处理→喷洒渗固剂→摊铺磨耗层→人工修整→初期养护→开放交通。



图 1 喷洒渗固剂



图 2 摊铺磨耗层



图 3 开放交通

三、工程应用情况

嘉尧线 K2+300~K3+100, K9+377~K10+397 渗固磨耗层, 全长 1820m, 总面积约 14748m², 原路面已实施注浆, 主要有一些横缝、纵缝、沉陷、块状裂缝等病害。对原路面较为严重的车辙、沉陷、拥包进行了铣刨修补, 再进行 1cm 渗固磨耗层施工。施工时间 2021.10.17~10.19。



图 4 原路面处理病害后



图 5 施工 2 个月后回访

四、成本造价

1cm 厚渗固磨耗层的施工单价约为 40.39 元/m²，常规的铣刨重铺一层 4cmSup-13（SBS 改性沥青）的施工单价约为 99.43 元/m²。渗固磨耗层相对于常规的铣刨重铺工艺节省了约 60%的成本。

五、应用效果

渗固磨耗层一方面通过预撒布的渗固组分恢复原路面老化沥青的性能，大幅提升基础层的抗疲劳特性、抗裂能力，并有效修复原路面缺油、松散等病害，封闭毛细裂缝，使路面整体更加密实、坚固，并起到增强与磨耗层之间层间粘结的作用。同时通过特种改性乳化沥青拌和料提供 1cm 厚的高耐久性磨耗层，以修复路面的早期病害，如网裂、横向裂缝、轻微车辙等。

渗固磨耗层技术作为一种功能性预防性养护技术，同时实现了逆转原路面沥青老化、修复病害和提供磨耗层三项功能。可保证 5 年内路面性能不出现明显退化。

该技术相比于常规的铣刨重铺工艺具有以下优点：1、提高路面稳定性；2、具有极佳的密封性能；3、具备出色的粘结性；4、抗腐蚀性强；5、耐磨耗性好；6、外观良好，更低碳环保；7、施工周期短，占道时间短；8、费用低，施工噪音小，扬尘小。

全寿命周期低碳环保高韧超薄沥青磨耗层技术

江苏省海安市交通运输局

一、适用场景

高韧超薄沥青磨耗层是一种新型预防性养护技术，是以性能处于国际领先的高粘高弹沥青和高粘改性乳化沥青为混合料和粘结层的胶结料，实施厚度为 0.8-2.0cm 的高性能沥青混凝土面层。相比传统磨耗层，具有优越的抗裂、抗渗和抗滑性能，可有效提升路面平整度，降低行车噪音。该技术体系凭借超宽温域的跨区域适应性、超薄路面结构设计、卓越的抗裂、抗渗、抗滑、降噪路用性能，结合高效降碳的摊铺施工工艺，充分契合了国家公路基础设施“经济耐久、绿色低碳”的建设需求，在国家农村公路提升改造中展现出广阔的应用前景。

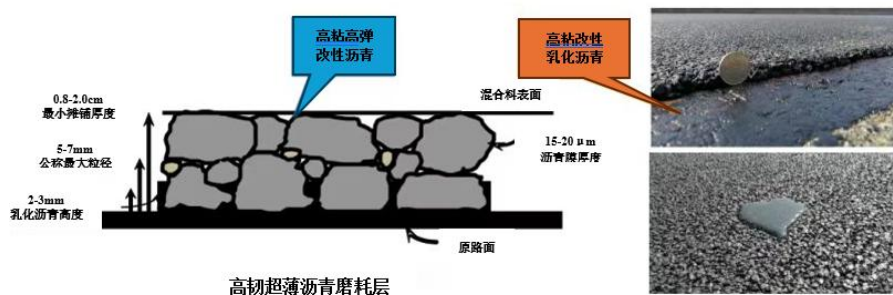


图 1 高韧超薄沥青磨耗层示意图



图 2 高韧超薄沥青磨耗层实操效果图

超薄结构：厚度仅为传统罩面的 1/3~1/2，超薄设计减少石料、沥青用量，碳排放降低 30%，符合农村生态保护要求。

高韧性：断裂伸长率可达普通沥青混合料的 3~5 倍；

快速施工：施工后 1~2 小时即可开放交通；

良好防水性：有效防止水分下渗；

优异抗滑性：构造深度大，提高行车安全性；

高韧超薄沥青磨耗层适用于预防性养护或品质和耐久性要求较高城市和农村公路、桥梁与隧道结构的水泥路面罩面。

1、适用病害类型

表面老化：沥青氧化、松散、轻微剥落；

轻度裂缝：宽度 $\leq 5\text{mm}$ 的反射裂缝、疲劳裂缝；

抗滑不足：路面摩擦系数低，影响行车安全；

轻度车辙：深度 $\leq 15\text{mm}$ 的浅层车辙；

防水修复：防止雨水下渗，延缓基层破坏；

2、适用公路等级

县道、乡道：交通量适中（500-5000 辆/日）；

村道：要求较高的农村公路，需经济、快速养护；

旅游公路：对路面美观、舒适性要求较高。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

高韧超薄沥青磨耗层采用高粘高弹改性沥青（非树脂类改性）。高粘高弹聚合物复合改性沥青通过分子结构设计，断裂伸长率达普通沥青混合料的 3-5 倍，有效抑制反射裂缝（反射率降低 80%以上）。

特殊粘结层设计防止水分下渗，浅层车辙（ $\leq 15\text{mm}$ ）修复后耐久性显著提升。

粘结层材料采用 SBS 改性高粘乳化沥青具有破乳速度快、粘结强度高的特点，与石料间的粘结力达传统乳化沥青的 2 倍以上，确保超薄层与原路面形成复合结构整体，防止层间剪切破坏。这种材料体系使磨耗层在极限薄层（1.5cm）条件下仍保持优异的抗滑、抗渗和抗车辙能力。

（二）工艺流程

高韧超薄沥青磨耗层采用同步/异步摊铺方式进行，主要工艺流程，如下所示：

封闭交通→原路面病害处理及清理→高性能粘层油洒布→沥青混合料拌合、运输、摊铺→压实→开放交通。



图3 高韧超薄沥青磨耗层流程示意图

施工周期：单日可完成 5000-8000m²，效率是传统铣刨加铺的 2-3 倍。

三、工程应用情况

在 2023 年南通市海安市县乡道和桥隧大修工程中，针对 A 段虬泓路（K0+697~K1+059）、仇双线（K11+010~K14+096）；B 段仇双线（K16+298~K20+349）；C 段仇双线（K22+452~K24+000）三段采用了高韧超薄沥青磨耗层罩面技术。

具体施工方案如下：首先对原路面进行局部维修。在完成原沥青路面局部维修后，裂缝及原路面接缝处铺设 50cm 宽自粘式高强复合布，随后撒布高性能粘层油，最后摊铺 2cm 厚的高韧超薄沥青磨耗层罩面 80000m²。

该技术施工 2 年后路面状况良好，抗裂、抗渗性能稳定，印证了其在农村公路中的长期可靠性。



图4 施工现场实拍图

四、成本造价

初始成本低：比传统铣刨加铺节省 30%~50%；
全寿命周期成本优：年均养护费用低于稀浆封层和微表处；
减少交通延误损失：快速开放，降低社会成本。
全生命周期成本优势明显：尽管初期材料单价较高（约比普通沥青高 20~30%），但得益于材料用量减少 60%、施工效率提升 250%、养护频率降低，综合成本可降低 30%以上。

五、应用效果

1、技术性能提升

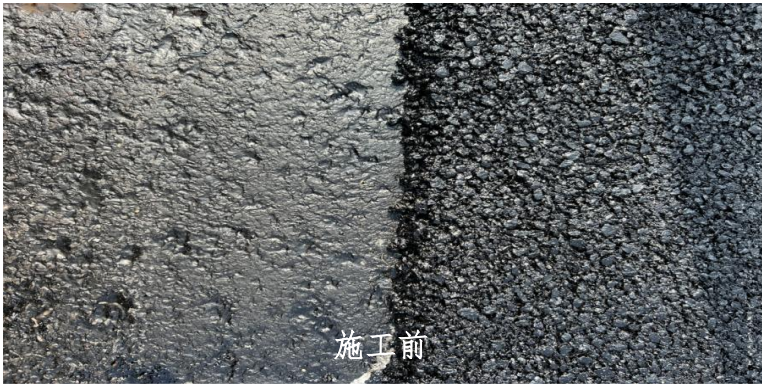


图 5 施工前后对比效果图

表 1 施工前后数据对比

指标	施工前	施工后	改善幅度
抗滑性（BPN）	45~50	65~70	+40%~50%
平整度（IRI）	3.5~4.0	2.0~2.5	提升 30%~40%
渗水系数（mL/min）	>300	<50	防水效果显著
裂缝反射率	30%~50%	<10%	降低 80%以上

2、社会效益

行车安全性提高：减少雨天打滑事故。
养护周期延长：减少频繁维修，降低养护压力。
节能环保：减少材料消耗，碳排放降低 30%。
高韧超薄沥青磨耗层技术以“薄、韧、快、省”为核心，兼具经济性、耐久性和环保性，是提升农村公路养护质量、实现长效低碳发展的理念。

预应力碳纤维索加固桥梁技术

浙江省遂昌县交通运输发展中心

一、适用场景

预应力碳纤维索加固桥梁技术是指将碳纤维索作为体外预应力构件安装于桥梁，可提高桥梁承载力、开裂荷载，提升桥梁技术状况等级。碳纤维索具有高强、耐腐蚀、耐疲劳、横向尺寸小等优点。该技术配备无线智能监测系统可以实现加固效果的长期跟踪监测，能满足桥梁空心板梁、T梁、小箱梁、现浇箱梁、盖梁等各类钢筋混凝土主梁的加固需求，适用于解决技术评定等级较差、裂缝超限、承载力无法满足规范要求等情况下的桥梁加固问题。

二、施工工况及工艺流程

预应力碳纤维索主要由碳纤维和聚合物树脂制成。施工过程需使用的设备包含钻孔设备、张拉设备及辅助设备。总体施工流程如下图所示：

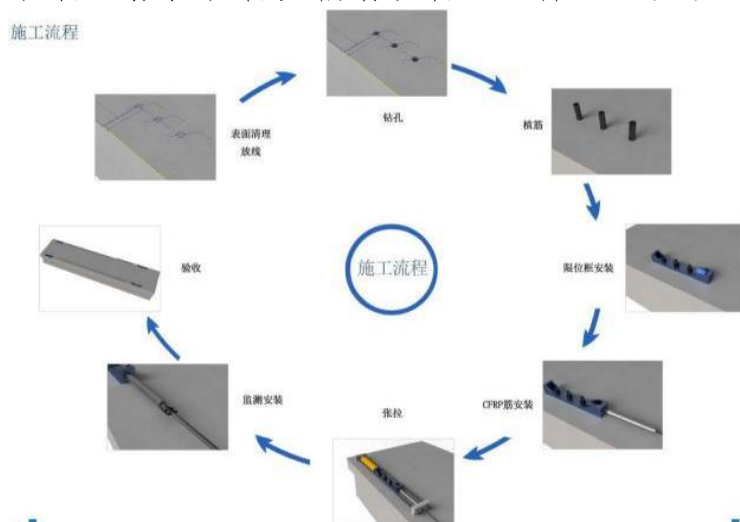


图 1 施工流程

（一）植筋

植筋大体分为七大步骤：定位、钻孔、清孔、螺杆除锈、注胶、种植钢筋及固化保护。



图 2 植筋

(二) 安装碳纤维索

1、锚具支座（反力架）安装：对支座处混凝土表面进行打磨，并清除干净，在支座与混凝土界面涂以粘钢胶，安装碳索固定端或张拉端锚具钢支座，使得粘钢胶从支座周边溢出，刮净胶体。



图 3 安装支座

2、成品预应力碳纤维索试安装：将成品预应力碳纤维索布置至设计位置，与固定端、张拉端锚具支座分别连接，同时，连接张拉端工具拉杆、工具挡板等，并安装标定千斤顶，连接油管，油和油表，通过千斤顶较小的顶力将预应力碳纤维索拉直，分别对张拉端、固定端锚具支座调平，保证张拉端锚具支座、固定端锚具支座，预应力碳纤维索在一条直线且同一平面上，通过松、紧螺栓进行锚具支座调平。



图 4 安装碳纤维索

3、安装智能监测装置：在预应力碳纤维索锚具上安装轴力监测传感器，以实现索力与裂缝发展情况的长期监测。该系统由力传感器、数据采集与处理及 4G 数据无线传输等模块组成。



图 5 安装索力及裂缝宽度监测系统

4、预应力碳纤维索安装：将成品预应力碳纤维索布置至设计位置，与固定端、张拉端锚具支座分别连接，同时连接张拉端工具拉杆、工具挡板等，并安装标定千斤顶，连接油管，油和油表。

5、张拉预应力碳纤维索：在开始正式张拉前须对预应力碳纤维索预紧，使碳纤维索整体绷直，检查两端是否受力均匀。按照 0%~20%~40%~60%~80%~100% 的碳索设计拉力进行分级张拉，采用张拉力和伸长量双重控制原则，张拉完后持荷 10 分钟，并锁紧螺母。



图 6 预应力张拉

6、防护：对碳纤维索、锚具以及锚具支座进行涂刷防护胶或安装保护罩进行防护处理。

三、工程应用情况

2025 年,该技术应用于遂昌县大田下桥。大田下桥(中桥)全长 48.2m,跨径组合为 3×13m,桥宽 10.5m,于 1998 年建成通车。主要病害为空心板跨中横向结构性裂缝,铰缝失效导致单板受力,技术状况评定为 3 类。加固设计对每片主梁布设 2 根 1φ10 的纵向预应力碳纤维索,以提升其抗裂性能和极限抗弯承载力;各跨横向布置 6 条 3φ10 的预应力碳纤维索,以提升主梁的横向联系及铰缝的竖向抗剪切能力。该桥利用监测系统计划对其中 4 根索的预应力进行长期跟踪监测。

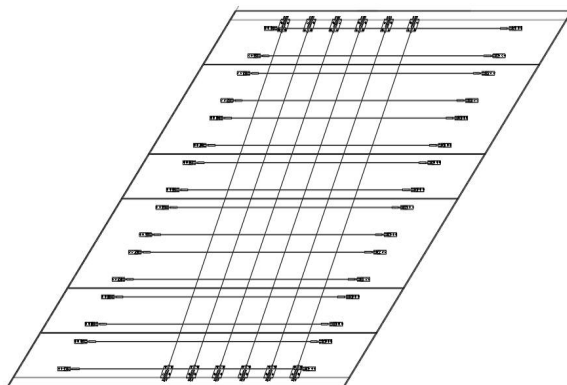


图 7 大田下桥预应力碳纤维索布置图



图 8 现场图

四、成本造价

大田下桥采用预应力碳索加固技术，建安费与常见的桥梁粘钢加固技术相近，但后期几乎无需维护，全寿命周期内该技术综合造价比传统技术减低约 25%。

五、应用效果

经计算分析，大田下桥采用预应力碳索加固后，纵向抗弯承载力提升 15%，铰缝抗剪承载力提升 10%。

对类似工程中预应力碳索加固效果进行长达 3 年的跟踪监测后可知，主梁的体外预应力碳纤维索构件的预应力损失小于 5%。

就地冷再生技术

山东省汶上县交通运输局

一、适用场景

就地冷再生结构层宜在春末和气温较高季节组织施工。施工期的日最低气温应在 5°C 以上，在有冰冻的地区，并应在第一次重冰冻（ $-3\sim-5^{\circ}\text{C}$ ）到来之前半个月到一个月完成。

广泛适用于平原、丘陵和山区等各类地形的农村公路。对地质条件要求不高，无论是普通土基、砂砾土基还是岩石地基上的公路，只要路面出现病害需要修复，均可采用。

主要针对农村公路路面出现的各种病害，包括但不限于车辙（深度在 $10\sim 30\text{mm}$ ）、坑槽（深度不超过 100mm ）、麻面、松散、龟裂、纵向和横向裂缝等。该技术可以通过对旧路面材料的再生利用，恢复路面的整体强度和平整度，有效解决路面病害问题。

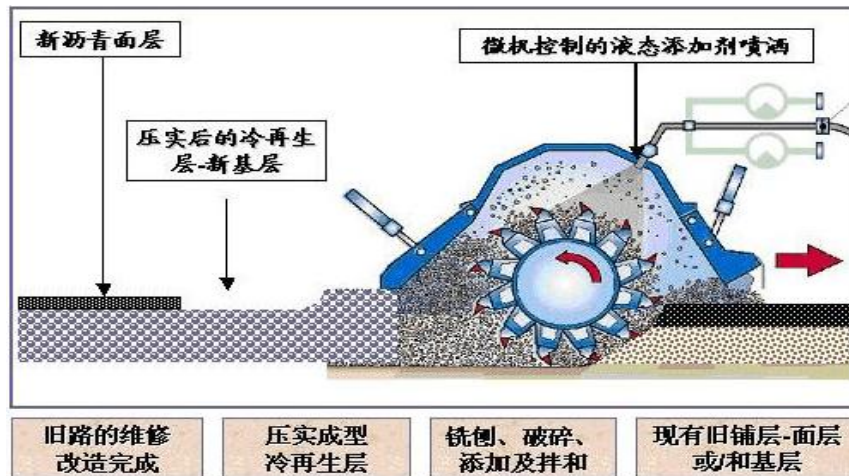


图 1 原理示意图

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求、设备类型

1、材料要求

（1）乳化沥青：慢裂快凝型，残留分含量 $\geq 60\%$ ，软化点 $\geq 55^{\circ}\text{C}$ ，延度（ 25°C ） $\geq 40\text{cm}$ ，与石料的粘附性不低于 4 级。

(2) 水泥：普通硅酸盐水泥，强度等级不应低于 32.5Mpa，初凝时间大于 3h，终凝时间应大于 6h 且小于 10h，质量必须符合现行国家标准等规定。

(3) 集料：新添加集料应洁净、干燥、无风化、无杂质，其颗粒形状、级配等符合设计要求，压碎值不大于 30%。

(4) 水：符合饮用水标准，不得含有影响再生混合料性能的有害物质。

2、设备类型

(1) 就地冷再生机：具备铣刨、破碎、拌和功能，铣刨宽度不小于 2m，深度可在 10-30cm 范围内调节。

(2) 乳化沥青罐车：储存和运输乳化沥青，容量不小于 10m³。

(3) 水泥撒布车：精确撒布水泥，撒布宽度和厚度可调节。

(4) 洒水车：提供施工用水，容量不小于 8m³。

(5) 装载机：装卸集料和其他材料。

(6) 压路机：根据压实层厚度选择单钢轮振动压路机（16-25t）、光轮压路机（18-21t）和胶轮压路机（20-25t），用于压实再生层。

(7) 平地机：施工过程中控制好平整度、设计标高和横坡度。

（二）施工工况、施工和易性

1、施工工况。施工前需封闭交通，设置明显的警示标志和安全防护设施，确保施工安全。施工现场应保持整洁，材料堆放有序。施工过程中要注意天气变化，避免在雨天或大风天气施工。

2、施工和易性。就地冷再生技术施工流程相对简单，设备操作较为直观，经过培训的施工人员能够较快上手。材料在常温下进行拌和，无需复杂的加热或特殊处理，施工和易性好，有利于提高施工效率。

（三）施工流程

施工准备（进行交通管制，设置警示标志）→路面清理（清除路面上的杂物、尘土、油污等）→铣刨破碎（铣刨深度一般为 10-30cm）→添加材料（严格按照设计配合比）→拌和（控制拌和速度和时间）→碾压（注

意控制碾压速度和遍数，遵循先轻后重、先慢后快的原则）→养生（采用土工织物覆盖养护的方法洒水保湿养生，养生期一般不少于7天）。流程图如下所示：

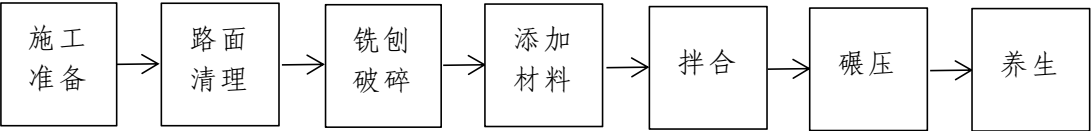


图 2 施工流程图

三、工程应用情况

该就地冷再生技术在汶上县农村公路养护工程中得到广泛应用。涉及农村公路主干道及支路共计 10 条，应用里程达 20 公里，应用面积约 13 万平方米。工程完工后，经过交工前第三方检测验收，各项指标均符合设计和规范要求，验收报告、施工记录等有关材料和文件齐全。通过该技术的应用，有效改善了农村公路的路面状况，提高了公路的通行能力和服务水平。



图 3 施工现场

四、成本造价

通过对比传统工艺（铣刨重铺），就地冷再生技术具有良好的经济性。

表 1 就地冷再生技术与传统工艺（铣刨重铺）对比表

对比项目	就地冷再生技术	传统工艺（铣刨重铺）
工艺原理	现场铣刨旧路面材料，掺入再生剂（如乳化沥青、水泥等），就地拌和、摊铺、碾压形成新结构层。	铣刨旧路面材料并运离现场，重新铺设新沥青混合料或基层材料。
原材料利用	100%回收利用旧路面材料，仅需少量再生剂。	需大量新集料、沥青等新材料，旧料多被废弃或低价值利用。
施工效率	工序简单（一次完成铣刨、拌和、摊铺），单日施工长度长（通常1-3公里）。	工序繁琐（铣刨、运输、新料摊铺等），单日施工长度短（通常0.5-1公里）。
工期	短，同比缩短30%-50%。	长，受运输、新料生产等环节制约。
交通影响	施工区域封闭范围小，可半幅施工，对交通干扰小。	需全幅或大段落封闭，交通中断时间长。
环保性	无废料运输，减少扬尘和碳排放（降低60%-80%）。	大量废料运输和新料生产，碳排放高，易产生扬尘。
后期性能	初期强度略低，需养护期，长期稳定性与传统工艺接近。	初期强度高，可快速开放交通。
综合成本	低，每平方米施工造价约35-45元，同比节省30%-40%（主要省材料和运输费）。	高，新材料采购和废料运输成本占比大。

五、应用效果

经过一年的使用观察，采用就地冷再生技术修复后的农村公路，路面状况良好，行车舒适性和安全性显著提高。再生层具有良好的水稳定性和抗滑性能，有效延长了路面的使用寿命。该技术的应用得到了当地村民和交通运输部门的高度认可，为农村公路的可持续发展提供了有力支持。



图 4 现状照片

公路桥梁桩基冲刷处治技术

山东省昌乐县交通运输局

一、使用场景

因河床下降，桩基础受冲刷外露，局部掏空，桩基础混凝土松散、钢筋外露锈蚀，影响桩基承载能力。采用增大截面法对桩基础加固，提高承载能力，采用柔性防护对桩基进行抗冲刷防护，提高抗冲刷能力。

增大截面法是通过在原有桩基外围增加混凝土截面和配筋，提高桩基的承载力、刚度和耐久性的一种加固技术。

适用范围：

- (1) 桩身缺陷：混凝土开裂、缩颈、离析等病害。
- (2) 承载力不足：原设计荷载增加（如建筑加层、桥梁拓宽）。
- (3) 抗震加固：需提高桩基延性和抗剪能力。
- (4) 腐蚀修复：桩身保护层剥落，钢筋锈蚀。

石笼防护技术是一种利用金属网箱（如镀锌钢丝、PVC 涂层钢丝或聚合物网格）填充石块或其他耐候性材料，构成柔性、透水性的工程结构。用于各种防止冲刷的防护技术。

适用范围：

(1) 防冲刷保护：在河岸、海岸等水流冲刷区域，石笼包裹桩基周围，防止土体流失（如桥梁桩基）。

(2) 边坡稳定：用于桩基邻近的边坡，通过石笼挡墙减少土压力对桩基的侧向荷载。

(3) 与桩基协同作用：石笼作为辅助结构，分散桩基承受的横向力，尤其适用于软土地基。

该处治技术经济实用，就地取材，适合因河床下降导致大量桩基外露的场景。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工资源

人员分工：技术组、施工组、监测组以及交通管制组。

材料：自密实混凝土、镀锌石笼网、块石等。

设备：挖掘机等。

（二）施工流程

1、对桩基专项检测，根据检测结果进行专项设计，制定维修加固方案。

2、根据专项设计文件，制定桩基冲刷处治施工方案；增大截面法对桩基础加固。

3、搭设工作平台，采取临时支撑等措施，对桩柱临时加固，防止墩柱倾倒。

4、表面病害处治：反挖河床，采用高压水枪清洗裸露部分桩基，人工清除桩基表面松散、被污染的砼，并对裸露钢筋进行除锈、阻锈处理，便于包裹混凝土与其充分粘结。

5、桩基加固：沿桩基外侧植筋并将钢筋笼与植筋固定，立模浇筑自密实混凝土。

6、石笼防护：桩基外侧设置石笼防护，石笼设置时应逐层摊铺块石，确保填石密实度，同时检查石笼网格的稳固性。

7、施工过程中桥面上应进行交通管制，以减少偏载作用对桩基的不利影响。

8、工程验收。

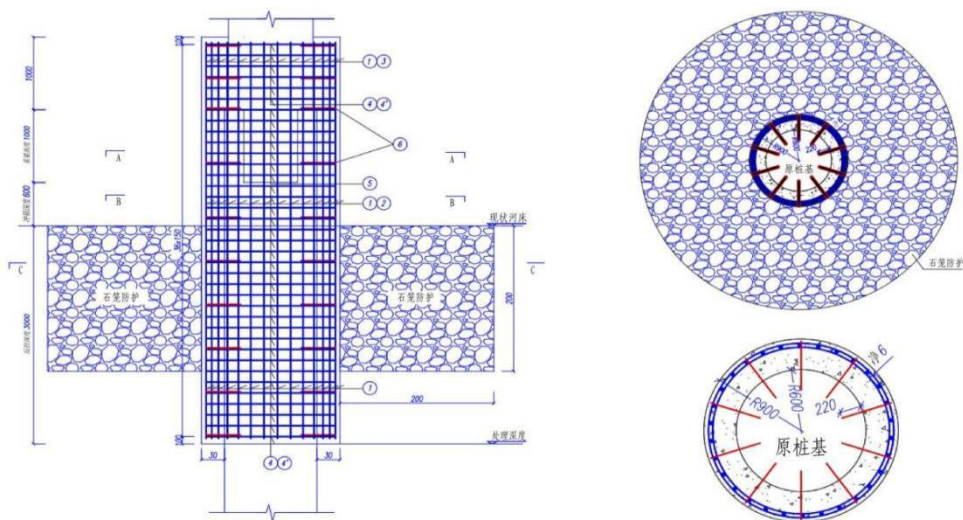


图 1 桩基加固示意图

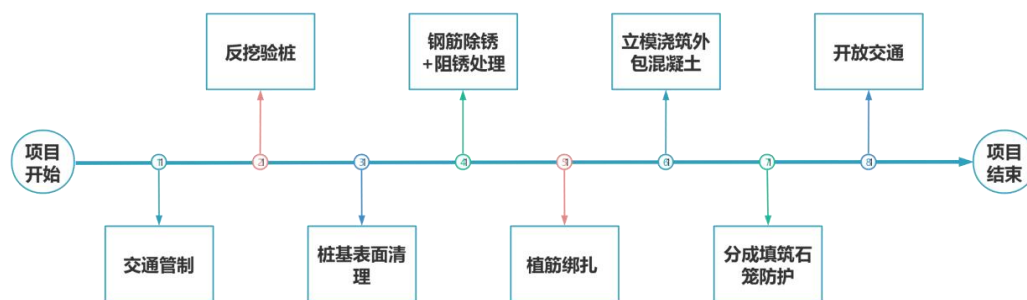


图 2 施工流程图

(三) 关键技术要求

外包混凝土方面，植筋深度要求为 $20d$ (d 为钢筋直径)，间距为 $30\text{cm} \times 30\text{cm}$ ；混凝土的坍落度需控制在 $220 \pm 20\text{mm}$ ，浇筑温度应在 5°C 至 35°C 之间。

石笼防护方面，填石的密实度需达到 90% 以上，石笼层间应错缝搭接，以确保防护效果。

(四) 现场作业图



图 3 桩基开挖



图 4 清除表面松散混凝土



图 5 桩基植筋



图 6 模板安装



图 7 浇筑完成



图 8 石笼防护设置

三、工程应用情况

县道青柘路丁家庄大桥维修加固工程中桩基维修加固主要涵盖 2#至 6#桥墩区段，具体方案如下：

1、反挖河床，反挖深度暂定 3m，开挖完成后对桩基完整性进行现场验桩，检验底部桩基是否存有缩颈、露筋等病害，并针对性处治。

2、采用高压水枪清洗裸露部分桩基，人工清除桩基表面松散、被污染的砼，并对裸露钢筋进行除锈、阻锈处理，便于包裹混凝土与其充分粘结。沿桩基外侧植筋并将钢筋笼与植筋固定，处理长度为系梁上方 1.0m 至反挖深度，立模浇筑 30cm 厚 C40 自密实混凝土。

3、对 2#-6#桥墩桩基外侧设置石笼防护，石笼高度为 2.0m，范围为桩基外侧 2.0m，石笼设置时应逐层摊铺块石，确保填石密实度，同时检查石笼网格的稳固性。

四、成本造价

采用增大截面法对桩基础加固、柔性防护对桩基进行抗冲刷防护的方案，在施工便捷性和对原结构扰动小的同时，还展现出卓越的成本经济性。与传统养护加固技术相比，该技术避免了大规模开挖和旧桩拔除，显著降低了人力、物力和时间成本。且依赖石笼的耐久性与低维护特性显著降低后期养护费用，相比拆除重建，综合加固成本降低 30%-50%，且施工周期短。

五、应用效果

项目改造前，桥梁桩基裸露，冲刷严重，影响桥梁运营安全，经过加固处治后，解决了桥梁安全隐患。

经过一年跟踪检测，期间经过洪水期的考验，运行情况良好。取得了显著的效果。通过与同一流域内其他桥梁的比较，该桥梁的桩基侵蚀现象明显降低。

四阶递进式工艺：农村公路“白改黑” 反射裂缝防治新技术

湖南省娄底市娄星区农村公路建设养护中心

一、技术背景及适用场景

随着社会经济高速发展，娄星区农村公路建设规模越来越大，特别是近几年，娄星区在进行路面“白改黑”的改造中，沥青路面反射裂缝成为公路建设的主要病害，这虽然与沥青混合料的自身特性、自然环境及交通量等因素息息相关，但更为根本的原因还是沥青面层下面的接缝或裂缝处治。为了更好处治路面裂缝问题，娄星区农村公路建设养护中心调查了解其他公路大修改造工程等项目中裂缝处治情况，采用农村公路“白改黑”防治反射裂缝病害新技术，实施效果良好，遂在农村公路养护工程中探索应用。

二、施工工况及工艺流程

（一）对原混凝土面层进行病害处理

利用弯沉值分析公路病害，采用贝克曼梁法对每一块混凝土板块进行弯沉检测。对水泥混凝土路面板块碎裂部位，采用整板破碎下挖，根据基底承载力的情况，换填处理，再重新浇筑混凝土面层；对于脱空板采用梅花状钻孔压浆处理。

（二）板缝处治技术创新（核心突破）

1、四阶递进式施工工艺

板缝处治技术通过清缝→植楔形体→铺防反带→封闭层四阶递进工艺实现结构性强化。首阶段采用双级清缝法：先以钢丝轮清缝机深度打磨裂缝，清除缝内泥沙及异物；再换装金刚石切割片对缝壁进行精密修整，确保清理深度，并采用高压风泵吹扫，使界面达到“无尘、无油、干燥”状态，为后续材料粘结提供理想基面。次阶段实施金刚砂楔形体植入：灌入粒径 2-3mm 的石英质骨料，整平至与路面齐平后，淋注环氧改性固结胶，胶体充分渗透填充骨料间隙，经 24h 固化形成孔隙率 35%±2%的蜂窝

状支撑体，可有效分散车辆荷载导致的接缝处应力集中。第三阶段铺设复合防反带：采用高强聚酯纤维布为增强骨架，复合热塑性弹性体基材，通过专用压辊使其与缝壁紧密粘合，形成跨缝“桥接结构”，该结构在-20℃低温下仍保持 7.8%延伸率，可阻断裂缝扩展路径并吸收 80%以上的层间拉应力。终阶段施作封闭层：均匀洒布有机高分子封层材料，形成连续防水膜，同时作为弱结合界面，协调沥青层与水泥板的变形差异，完成从微观填充到宏观封闭的立体防护体系构建。

2、工序

(1) 清缝

裂缝清理：用安装钢丝轮的清缝机打磨裂缝，清除缝内泥沙及异物。

接缝清理：用安装切割片的清缝机沿接缝对旧填料进行切割清理，切割出缝两边陈旧材料和缝中的其它杂物；用安装切割片的清缝机对缝壁进行打磨，清理深度 30mm。用高压风泵或其它清扫设备清扫施工面，清除施工面上的尘土杂物，清除接缝、裂缝中的灰尘，保持接缝、裂缝干净干燥。

质量控制点：

①施工场地干净，不污染清理干净后的接缝、裂缝；

②接缝、裂缝干净干燥。



图 1 接缝清理

（2）植入构件

灌入粒径合适（通用粒径 2-3mm）的干净干燥石英质或矿渣类颗粒。将灌入接缝、裂缝中的颗粒整平至与路面平。



图 2 配制灌缝料

质量控制点：

①严格按材料要求进行检测，检测合格后方可用于施工。

②严格按材料使用要求使用材料。

③保证材料能充分润湿接缝、裂缝中的颗粒，抽检没有干燥颗粒。将防水材料淋注在接缝、裂缝上，充分润湿填充植入构件，并在构件表面形成防水膜层。



图 3 灌缝作业

（3）粘贴专用特制高强纤维带

用高压风泵清除施工面上的尘土、杂物，再将高强纤维带以裂缝为中线，均匀粘贴在裂缝上，充分覆盖裂缝，压刮布条，将布条下多余的浆料挤出，保证贴合密实。

质量要求：

- ①纤维带最大拉力（纵、横） $\geq 40\text{kN/m}$ ，干燥平顺。
- ②贴合密实，没有翘起，皱褶现象。



图 4 粘贴专用特制高强纤维带

（4）洒布有机高分子专用封层施工

- ①封层施工采用洒布车洒布，洒布施工时，增黏剂材料应呈雾状喷出，提前调节洒布油嘴高度和角度，使同一基层点同时接受 2-3 个油嘴的油量。
- ②按电脑设定的洒布量匀速洒布材料。
- ③洒布车进行洒布作业时，先洒靠近中央分隔带的一个车道，由内向外，一车道接着一个车道的喷洒，下一个车道与前一个车道原则上不重叠或少重叠，但不能露白，露白处需人工补洒。
- ④在沥青摊铺前，任何车辆与行人都不得进入已经完成封层施工的区域。
- ⑤封层施工后，养护 24 小时，尽快进行沥青摊铺。

三、工程应用情况

1、在养护工程白改黑改造项目中，娄星区万宝镇黑泥塘至槐柳美丽乡村路改建工程、2024 年娄星区 X023 线大修工程采用白加黑工程反射裂缝病害防治新技术，在不破坏原有的水泥砼面板的结构，将原有水泥砼面

板结构作为沥青路面的基层，采用新工艺、新技术处治水泥路面接缝，预防及延缓后期反射裂缝的发生，提高白加黑路面改造工程的耐久性。

2、在沥青路面裂缝修补项目中，娄星区农村公路沥青砼路面预防性养护处治工程采用沥青路面裂缝修补新技术，针对沥青路面裂缝修复不便的情况，新技术中原材料流动性强，成型后强度高，提高了裂缝修补强度和防水密封性。

四、成本及经济适用性

1、与传统碎石化工艺相比：新技术成本仅为 11.6 元/m²（35 元/m），对比传统碎石化工艺，成本直线下降；工期短，新技术所用时间对传统碎石化工艺而言，几乎可以忽略不计。

2、与传统沥青灌缝相比：新技术针对延缓反射裂缝平均时限为 3-5 年，对比传统沥青灌缝的平均 1-1.5 年，大大延长。且从综合年限（按最低 3 年算）的平均价格（新技术 3.86 元/m²/年）计算，新技术相较于传统沥青灌缝综合成本更具性价比。

五、应用效果

1、在不破坏原有的水泥砼面板的结构，将原有水泥砼面板结构作为沥青路面的基层，采用新工艺、新技术处治水泥路面接缝，预防及延缓后期反射裂缝的发生，提高白加黑路面改造工程的耐久性。

2、针对沥青路面裂缝修复不便的情况，新技术中原材料流动性强，自密实强，成型后强度高，切实提高了裂缝修补强度和防水密封性。

3、新技术因未采用沥青材料，无以往因沥青灌缝时施工车辆等粘连污染现象，无多余沥青材料覆盖，无环境污染，现场整洁，作业规范。

拉杆格构梁法加固桥台技术

重庆市潼南区交通运输委员会

一、适用场景

拉杆格构梁法主要适用于桥台出现开裂、横向变形等病害的情况。当桥台由于土压力、支座反力、地基沉降不均衡、雨水下渗等问题，导致台身混凝土抗剪能力不足，在行车荷载作用下发生剪切破坏，出现开裂、横向变形现象时，该方法能有效限制横向变形和裂缝发展。尤其是对于那些病害发展迅速，严重影响行车安全的桥台，该工法通过格构梁对穿拉杆锚固的方式，可增强桥台结构稳定性，保障桥梁安全运营，达到安全经济可靠的目的。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料、设备与人员要求

（1）材料要求

①.采用 HRB400 钢筋作为格构梁的主筋和箍筋。钢筋应具有出厂质量合格证明书，进场后需按规定进行抽样检验，确保各项指标满足设计文件及规范要求。

②.混凝土可采用强度等级为 C40 的微膨胀自密实混凝土。混凝土应满足设计文件及规范要求，确保混凝土具有良好的和易性、强度及耐久性。

③.采用 HRB400 钢筋作为拉杆材料，直径一般不小于 28mm。

④.采用 PVC 管作为成孔后的套管，如塌孔严重、PVC 管材插入困难，可采用薄壁钢管。

（2）设备类型：需配备钻机用于成孔，注浆泵用于注浆，插入式振捣器用于混凝土振捣，电焊设备等。

（3）人员分工：施工管理人员负责制定计划、协调进度、监督质量；技术人员核查图纸、技术交底、解决技术难题；作业人员需具备相关技能经验，按要求作业。

(二) 施工流程

(1) 施工工艺

①.清理作业面：清理桥台表面，人工挖除部分锥坡，形成作业面。

②.放线定位、成孔：按设计要求，以第一排拉杆标高为准向下类推确定位置；根据现场桥台宽度、台背填料等因素选用合适钻机成孔，高压风机清孔，必要时套管跟进防止孔壁坍塌。

③.安放拉杆并注浆：为保证拉杆在孔内居中，每隔 2m 设置一个定位架用来支撑拉杆，拉杆两端设钢垫板，钢垫板预埋在格构梁内。注浆管应随拉杆一同送入，一端封闭，另一端注浆，注浆时边注边拔，使注浆管始终有一段埋于注浆液中，直到注满为止。

注浆压力要求：泵压控制在 0.3-0.5MPa 之间，注浆时压力不能过大，防止封端产生不利影响。

注满标准：当注浆口浆液外溢时可停止注浆。

④.现浇钢筋混凝土格构梁、封锚施工：拉杆安装就位后，根据图纸放出格构梁中心轴线、顶、底线，支模板，绑扎钢筋，现浇混凝土；待格构梁混凝土的强度达到设计强度的 80%时，拧紧拉杆螺帽，浇筑封锚混凝土。



图 1 施工流程图



图 2 现场作业照片

三、工程应用情况

在 2023 年潼南区公路及附属设施灾后恢复重建工程中，山凌桥采用拉杆格构梁加固桥台方案。该桥为 $2 \times 10\text{m}$ 空心板简支梁桥，桥梁全长 36.07m ，全宽 8m ，桥台为重力式 U 台。桥台侧墙、前墙开裂，裂缝总长约 19.62m ，宽度均大于 0.15mm ，且裂缝宽度有发展趋势。



图 3 施工前桥台病害照片

针对该桥桥台开裂病害，对裂缝进行灌缝处治后，采用拉杆格构梁法加固。在桥台侧墙布置格构梁，长度 3.4m，高度 4.4m，共设置 5 排拉杆，有效增强了桥台侧墙稳定性，提升了桥梁整体承载能力，保障了后续使用安全。



图 4 施工后桥台照片

四、成本造价

工程造价包含人工费、材料费、机械设备使用费，根据工程规模、地域不同有略微差异。总体来看，相比拆除重建桥台方案，拉杆格构梁法成本大幅降低，约为拆除重建成本的 30%，具有良好的经济性。

五、应用效果

从施工质量看，拉杆格构梁法新旧结构界面黏结可靠、工艺可控性强、构件质量高、工程风险低。

从应用效果看，拉杆格构梁法抵抗台身变形能力强、耐久性好，有效提高了桥台稳定性，防止病害发展，保障了桥梁运营安全，延长了桥梁使用寿命。

结合该桥梁通车近一年后调查结果显示，该桥桥台未出现裂缝继续发展的现象，桥台稳定性良好。

石拱桥高压灌浆及套箍封闭修复加固技术

重庆市涪陵区交通运输委员会

一、使用场景

石拱桥高压灌浆及套箍封闭修复加固技术通过高压灌浆对增强拱上侧墙、桥台裂缝进行修补，提高结构整体受力性，延缓裂缝发展；同时，通过环向植筋与现浇混凝土套箍，提升石拱桥主拱圈整体刚度，承载力提升 35%~60%左右。

该项技术主要适用于重庆山区典型的多跨实腹式石砌拱桥，通过对存在拱圈灰缝脱落、侧墙外倾、桥面铺装贯通裂缝等典型病害进行有效修复与加固，可系统性解决石拱桥因材料老化、荷载超限导致的结构病害，实现安全、经济、耐久的修复目标。



图 1 山区典型多跨实腹式石砌拱桥示意图

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

- 1、混凝土：拱圈加固采用 C30 自密实混凝土。
- 2、注浆材料：采用 M15 水泥砂浆，面层采用 1:2 防水砂浆。
- 3、钢筋：直径大于等于 12mm 钢筋采用 HRB400，直径小于 12mm 钢筋采用 HPB300。直径大于 16mm 的钢筋采用机械连接，其余钢筋采用单面焊连接，焊缝长度不小于 10d。

4、裂缝修补材料用环氧砂浆，性能指标必须达到表 1。

表 1 环氧砂浆性能指标

名 称		环氧砂浆
性 能 指 标	含 气 量	$\leq 5.8\%$
	可用时间	1 小时（20℃）
	空 隙 率	$\leq 2.5\%$
	抗压强度	$\geq$ 被修补混凝土的强度
	抗折强度	≥ 6.0 MPa
	粘结强度	≥ 2.5 MPa
	抗渗压力（7d）	≥ 1.5 MPa

（二）施 工 流 程

该技术施工工艺流程如下：基础及河道处理并搭设支架→拱圈加大截面砼浇筑→拱上建筑加固→桥面系加固并开放交通。



a)基础处理及支架搭设



b)拱圈浇筑及拱上建筑加固

图 2 施工工艺现场照片

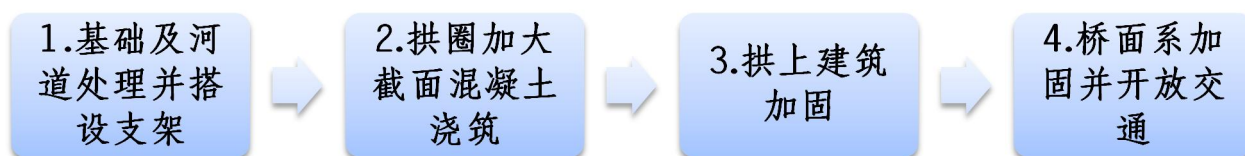


图 3 施工工艺流程图

(三) 工艺技术

1、高压灌浆加固技术

为了增强拱上侧墙、桥台等的受力整体性及防止砂浆裂缝的扩展,采用高压灌浆加固技术进行处治。要求用灌浆机进行灌浆,灌浆压力介于1.2~2.5MPa,灌浆水泥标号不低于42.5号,水泥砂浆标号不低于M15号。

注浆加固步骤为:造孔→钻孔→冲洗→灌浆。

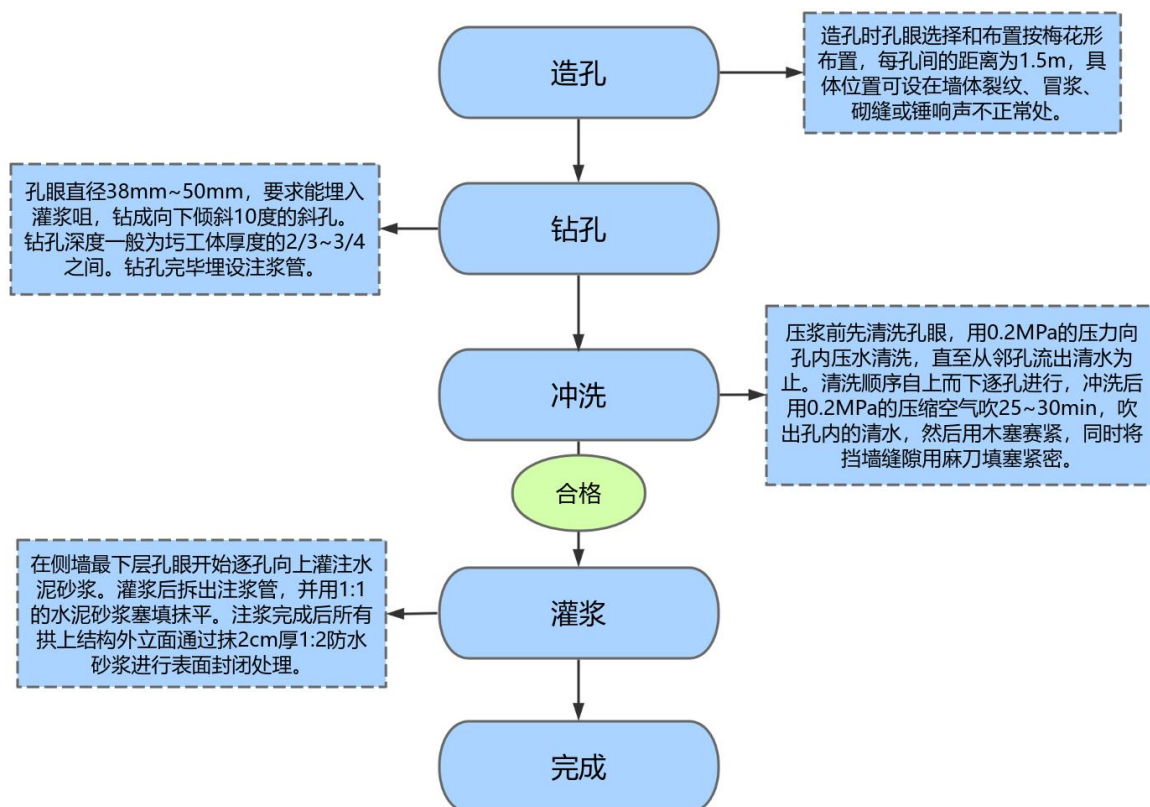


图4 高压灌浆加固技术工艺流程图

2、钢筋混凝土套箍封闭拱圈加固技术

为了提高原桥的受力整体性和承载力,增强结构的耐久性能,采用钢筋混凝土套箍封闭主拱圈技术对桥梁拱圈进行加固。主拱圈拱腹及拱侧加固层20cm厚C30自密实砼。拱圈混凝土加固采用从拱顶段开孔注入砼,通过振捣使砼沿底模往两侧拱脚移动。拱上部分要在拆除主拱圈模板,主拱圈混凝土强度达到一定要求后再进行施工,以达到新增钢筋混凝土套箍与原结构协调变形、共同受力及原主拱圈抗风化、防水蚀的目的。钻孔部

分后续使用 C30 自密实混凝土浇筑至拱圈部分，其余孔洞位置用原拱桥的同等填料填密实。

3、外立面防风化

为了阻止桥梁外表面砌体进一步风化,加固设计通过在外表面裸露砌体上抹 2cm 厚 1:2 防水砂浆进行保护，水泥砂浆中加入适量的速凝剂。

4、裂缝封闭

对于宽度 $<0.15\text{mm}$ 的混凝土或砌体裂缝，采用裂缝封闭胶直接封闭的方法；裂缝表面涂刷封闭的施工方法：用小铲刀将封缝胶刮抹到裂缝上，厚度 1mm 左右，宽度 20 ~ 30mm。抹胶时应防止产生小孔和气泡，要刮平整，保证封闭可靠。

三、工程应用情况

涪陵区百胜镇红花桥位于重庆市涪陵区百胜镇乡道 Y006 来龙路 K5+067 处，跨越沟壑。桥梁多跨实腹砌石圆形拱桥，为直桥。桥梁全长 20.0m，桥面全宽 4.6m，跨径组合为 $1\times 2.0\text{m}+1\times 6.7\text{m}$ 。根据《定检报告》：红花桥技术状况得分为 78.5，拱上结构得分为 50.5，且拱上结构病害较严重影响结构安全，因此本桥全桥技术状况按最差部件评分，属于 4 类桥梁，即主要构件有大的缺损，严重影响桥梁使用功能。



图 5 百胜镇红花桥（修复加固前）

针对百胜镇红花大桥采用高压灌浆及套箍封闭技术进行修复加固：主拱圈采用增大截面补强，对拱上侧墙和桥台进行注浆加固；清理桥台、拱圈、拱上侧墙砌体表面，采用 M15 水泥砂浆对砌体结构填缝、勾缝。



图 6 百胜镇红花桥施工后（修复加固后）

四、成本造价

通过对比修复加固技术与常规“拆除重建”方案，综合效益显著。

表 2 石拱桥“拆除重建”技术与“修复加固”经济效益对比

技术对比	拆除重建	修复加固	效益对比
典型结构	采用小跨径空心板拆除重建	采用拱圈扩大截面法进行加固	—
是否新增用地	是	否	无新增用地
每平方造价	约5500元/平方米	约2000元/平方米	下降 > 60%
老路利用程度	新建桥梁需满足相关规范，改造搭接公路	充分利用现有结构	废料产生降低 > 90%
封闭施工时间	120天全封闭、开挖	30天封闭施工	下降 > 75%
附属设施	路缘石、人行道、管道全部调整	基本无需改造	影响小
施工难度	较大，需要做好各个环节的管理	较小，工期短，需要专业团队配合	施工难度小
施工噪音	大，尤其是板块破除	较小	降低 > 80%

五、应用效果

该项技术将传统工艺与现代材料结合，保留了原有石拱桥的风貌和历史价值，结构加固技术高效提升承载力。

百胜镇红花桥经过修复加固后承载能力恢复到公路-II级标准，外观基本保持原貌，安全性和耐久性显著提高，延长了桥梁使用寿命并促进了区域经济发展和村民出行便利。

水泥混凝土路面病害“白改黑”修复技术

云南省鹤庆县交通运输局

一、适用场景

1、从环境适用性来看。水泥混凝土路面病害“白改黑”修复技术可在高原、平原、微丘陵以及重丘地区适用，能够在多雨和潮湿的环境下有效地增强路面的防水性能，确保路面使用耐用性。在地质条件相对稳定的区域，修复效果最佳，对于软土地基等特殊地质路段，必须先进行地基处理，然后才能进行路面修复。

2、从病害适用性来看。主要针对水泥混凝土路面使用多年后出现的纵向裂缝、横向裂缝、网状裂缝、路面面板断裂等病害，以及由于磨损、老化或其他原因导致的坑槽问题。通过对常见病害的深入分析和研究，提出有效的修复和预防措施，以延长路面的使用寿命并确保行车舒适和安全。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

1、沥青：选用的标号不得低于 70 号的 A 级公路石油沥青，其主要性能指标：针入度（25℃、100g、5s）在 60-80（0.1mm）之间，15℃时延度不小于 100cm，软化点不小于 45℃。

2、集料：选用本地石灰岩，经大型反击式破碎机加工生产的粗细集料。粗集料主要性能指标：压碎值不大于 30%，洛杉矶磨耗值不大于 35%，与沥青的粘附性不小于 4 级；细集料主要性能指标：表观相对密度不小于 2.45t/m³，砂当量不小于 50%，小于 0.075mm 的含量不大于 5%。

3、矿粉：选用本地石灰岩矿粉，其主要性能指标：表观相对密度不小于 2.5t/m³，含水量不大于 1%，塑性指数不大于 4%。

4、粘层油：主要用于增强新铺设的沥青混凝土层与已经存在的旧水泥混凝土路面之间的粘结力，选用阳离子改性乳化沥青，破乳速度采用快裂或中裂 PC-3 型。

5、玻纤格栅：主要功能是防止旧水泥混凝土路面出现裂缝的反射现

象，采用无碱或中碱性的玻璃纤维，其主要性能要求：拉伸强度不低于80kN/m，断裂延伸率不大于3%，网格尺寸选用40mm×40mm。

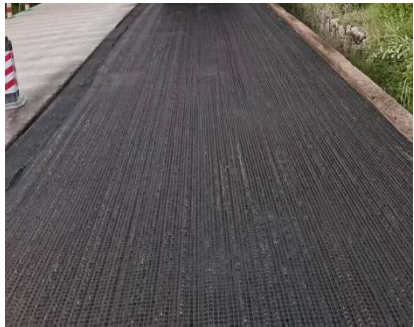
（二）设备需求。铣刨设备（宽度在1米至1.5米之间）、清扫设备、沥青洒布设备（沥青洒布车）、搅拌设备（间歇式或连续式沥青混凝土搅拌站）、摊铺设备（自动找平沥青混凝土摊铺机）、压实设备（1至2台双钢轮压路）。

（三）施工工况。施工温度宜在10℃-35℃之间，雨天、雪天及大风天气不得施工。沥青混凝土混合料应具有良好的和易性，在运输和摊铺过程中不发生离析、结团等现象。

（四）施工流程

表1 “白改黑”修复技术施工流程、技术要求及作业图片

施工流程	技术要求	现场作业图片
1、水泥混凝土路面病害检查与处理	对水泥混凝土路面进行全面的病害检查，移除破碎的面板并用C30混凝土进行修补，对裂缝采用水泥浆进行灌缝处理；同时，对旧路面的病害区域进行明确标记。	
2、铣刨与清扫	铣刨作业：依据路面病害的检查结果，使用铣刨机对受损的混凝土路面进行精确铣刨，深度为5.5厘米（沥青混凝土面层的修复厚度设定为6厘米）。 清扫过程：通过扫地车和吹风机迅速移除铣刨后产生的路面碎屑和尘土，确保路面的清洁度。	

施工流程	技术要求	现场作业图片
3、喷洒粘层油	在铣刨后的路面上均匀喷洒粘层油，洒布量介于0.6-1.2千克每平方米。	
4、玻纤格栅铺设	在粘层油洒布后的5至10分钟内，应及时铺设玻纤格栅，以防止沥青冷却而影响粘结效果；鉴于病害多为坑塘式，需采用人工铺设方式，确保格栅平整且牢固。	
5、沥青混合料拌制与运输	拌合：依据设计配合比精确拌制混合料，严格控制搅拌时间和温度。 运输：利用涂有防粘剂的自卸汽车进行混合料运输，并使用篷布覆盖车厢，以实现保温、防雨和防污染。	
6、沥青混凝土摊铺	主要控制沥青砼摊铺温度、速度、厚度、平整度及与原路面衔接等核心方面，确保沥青砼摊铺层均匀、密实、平整，为后续碾压成型和路面整体性能奠定基础。	

施工流程	技术要求	现场作业图片
7、沥青混凝土压实	控温：初压、复压、终压，温度符合规范要求，终压不得低于80℃； 碾压：由低到高、由边到中，速度均匀（2-5km/h），轮宽重叠1/3-1/2，避免急停急转；外观要求表面平整、无轮迹、推移、开裂。	
8、养护	压实作业完成后，在路面温度降至正常水平之前，应封闭交通进行养护。	

三、工程应用情况

在大理州鹤庆县东山线的修复养护工程中，成功应用了“白改黑”技术。该施工路段全长 11.537 公里，由于长期承受重载车辆的频繁通行，水泥混凝土路面出现了多处裂缝、表面损坏、不均匀下陷、断裂以及坑槽等病害。为了解决这些问题，本次修复养护工程采用了沥青混凝土对水泥混凝土病害进行修复，修复 34 个病害处置点总面积为 4291 平方米。施工过程中，严格遵循既定的施工工艺流程，确保了工程质量。工程竣工后，交通运输部门依据《公路竣（交）工验收办法》组织了项目的交竣工合并验收，工程质量鉴定得分为 92.64 分，质量等级评定为优良。

四、成本造价

通过对比“白改黑”修复技术与传统水泥砼修复技术，综合成效明显。

表 2 农村公路“白改黑”修复技术与传统技术对比

对比项目	传统水泥砼修复	“白改黑”修复
1、施工工艺	现有破损路面整体挖除后再浇筑新的水泥砼面板	现有破损水泥路面进行处理（清缝、灌缝、铣刨、拉毛、洒布粘层油、铺设土工格栅），再摊铺沥青砼面层
2、对老路利用	现有路面整体挖除，未进行充分利用，废弃量大，产生的建筑垃圾多	老路结构保留利用，基本不产生废弃工程，铣刨的碎石料用于沿线土路肩培土
3、施工周期	较长，需开挖、浇筑砼及养护（通常28天强度达标后通车），交通管制时间较长，保通压力大	较短，路面经铣刨、拉毛等处理后摊铺沥青，数小时可开放交通，交通管制时间较短
4、行车体验	刚性大、噪音大、舒适性较差	平整度高、噪音小、舒适性好
5、抗裂与适应性	刚性强，易因温度变化或沉降产生裂缝，接缝处理不当易跳车	沥青有一定柔性，可缓解轻微基层沉降；玻纤格栅发挥了抗裂、加筋、稳定结构的作用，整体抗裂性较好
6、施工造价	造价较高	同比造价下降约20%
7、施工噪音	较大，尤其是砼板块破除	较小

五、应用效果

经过两年的使用观察，修复后的沥青混凝土路面整体状况良好，原有的裂缝、断板、坑槽等病害得到了有效治理，反射裂缝得到了较好的抑制，路面的抗滑性能保持良好，行车舒适性显著提升。沥青混凝土修复在施工成本、施工周期、行车舒适性、后期养护成本、产生的建筑垃圾等方面均优于传统水泥混凝土修复，对于沿线村庄众多、车流量大、无法封闭施工的农村公路尤为适合，也体现了农村公路“少投入、快见效”的养护需求。



图 1 “白改黑”修复路段 2 年后实施前（左）实施后（右）对比



图 2 “白改黑”修复路段局实施前（左）实施后（右）对比

水泥就地冷再生技术在农村公路养护中的应用

陕西省礼泉县公路管理站

一、适用场景

水泥就地冷再生主要适用于以下场景：

1、旧沥青路面改造：可对破损、老化的沥青路面（如城市公路、国道、省道等）进行再生利用，将旧路面铣刨后与水泥等材料现场拌和，重新铺筑，实现资源循环利用，降低建设成本。

2、基层维修与重建：用于公路基层的维修或新建，尤其适合处理基层强度不足、出现病害的情况，通过冷再生工艺提升基层性能，保障公路结构稳定性。

3、低等级公路建设：在县、乡、村等低等级公路的新建或改建中应用，能以较低成本满足公路使用要求，同时减少对环境的影响。

二、施工工况及工艺流程

水泥冷再生施工适用于常温环境，无需对旧料加热，可在气温 5°C 以上、非雨天进行，避免低温或雨水影响材料凝结和强度形成。施工时需保证现场交通条件允许铣刨、拌和、摊铺等设备的有序作业，且旧路面破损程度适中（如存在龟裂、车辙、松散等病害，但无严重结构性破坏），以便旧料能有效再生利用。其工艺流程如下：施工准备→旧路铣刨与破碎→材料配比→拌和与整型→碾压→养生与交通管制→验收与后续施工。



旧路取样



铣刨与破碎



再生拌和



整形



图 1 施工工艺流程

（一）施工准备

勘察旧路状况，检测路面破损程度、强度等指标，确定再生深度（通常为 15-30cm）。

清理路面杂物，规划施工区域，做好交通疏导。

准备水泥、水等材料，调试冷再生设备（如铣刨机、再生机等）。

（二）旧路铣刨与破碎

用铣刨机将旧路面按设计深度铣刨，破碎后的旧料粒径需符合再生要求（一般不大于 30mm），并堆放至指定位置（旧路面层低于 5cm，可直接用于基层拌和）。

（三）材料配比

按设计配合比（水泥用量通常为 3%-5%），将旧料、水泥、水在现场用冷再生机均匀拌和。拌和过程中需控制含水量，确保混合料满足摊铺要求。

（四）拌和与整型

用水泥冷再生机将混合料拌和至设计厚度，通过平地机整型，控制路面高程和横坡。

（五）碾压

采用振动压路机先轻压 1-2 遍，再重压 2-3 遍，最后用胶轮压路机收光，确保压实度达到设计标准（一般不低于 96%）。

（六）养生与交通管制

碾压完成后及时覆盖保湿，养生期 7 天左右，期间禁止车辆通行，确保强度正常增长。

（七）验收与后续施工

检测再生层的强度、平整度等指标，合格后可进行沥青面层摊铺或其他后续工序。

整个流程注重旧料循环利用和环保施工，相比传统工艺可缩短工期、降低成本，同时减少建筑垃圾。

三、工程应用情况

近年来，我局采用水泥就地冷再生工艺进行农村公路养护工程实施，取得良好效果。2024 年 7 月，礼泉县叱药公路马铃薯村至白井村段大中修工程中采取水泥就地冷再生工艺，施工路面长度 4826 米，宽 7.0 米，面积 337822m²，经验收各项指标均符合竣交工验收要求，验收质量合格。

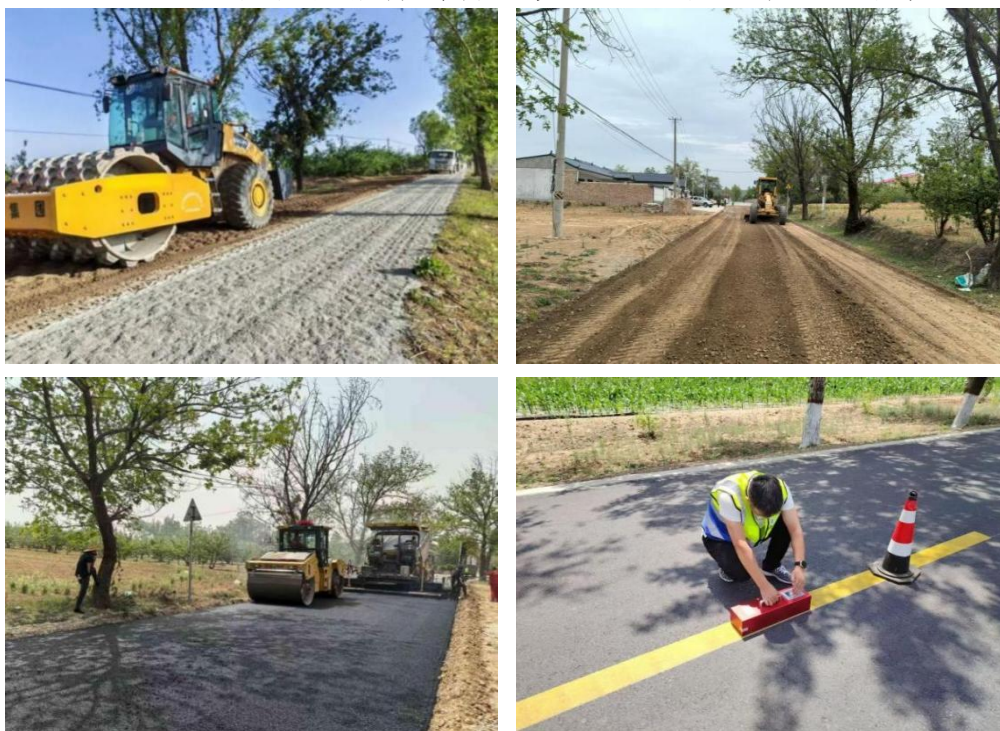


图 2 叱药公路马铃薯村至白井村段施工现场

四、成本造价

冷再生造价受区域、工程规模、旧路状况、水泥用量、施工季节、设

备类型及台班费、人工成本、管理费等多种因素影响。水泥冷再生工艺相对采取传统旧路铣刨，重铺水泥稳定粒料基层施工工艺，可节约造价 30 % 以上，极大的提升了养护资金效率。

五、应用效果

实践证明，水泥就地冷再生技术在农村公路旧沥青混凝土路面养护工程中优势突出，在确保工程质量的基础上节约成本，节约资源，缩短工期，减少干扰，是兼具实用性与可持续性的公路养护改造技术



图 3 新路



图 4 旧路

水泥稳定类基层冷再生技术

甘肃省泾川县交通运输局

一、适用场景

水泥稳定类基层冷再生技术适用于多种环境场景，尤其在农村公路养护中优势显著。该技术对路面裂缝（如横向裂缝、纵向裂缝、网状裂缝等）、路面坑槽、松散、麻面等病害能起到良好的修复和改善作用，通过对旧路面材料的重新利用和再生，可有效恢复路面的使用性能，延长公路使用寿命。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工材料要求

水泥：应选用初凝时间大于 4h，终凝时间大于 6h 且小于 10h 的普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥或火山灰质硅酸盐水泥。水泥强度等级宜为 32.5 或 42.5，且应疏松、干燥，无聚团、结块、受潮变质现象。

集料：就地冷再生新加入的粗细集料、填料质量应符合现行《公路路面基层施工技术细则》（JTG/TF20-2015）要求，粒径、形状、级配等需根据设计要求进行选择。

水：施工用水应清洁，不含有害杂质，一般可采用饮用水。

（二）施工设备类型

冷再生机：作为核心设备，其工作装置的切割深度可精确控制，误差不得超过 10mm。

水泥撒布车：用于精确撒布水泥，确保撒布的精确性和均匀性。

洒水车：洒水量可根据实际情况进行调整，以满足不同施工阶段对含水量的要求。

平地机：用于对再生后的混合料进行初找平，然后刮平至设计高程，保证路面的平整度符合设计要求。

压路机：配备足够数量、吨位的钢轮压路机、轮胎压路机，一般至少配备 12t 以上双钢轮振动压路机 1 台，18t 以上单钢轮振动压路机 1 台，25t 以上轮胎压路机 1 台。



图 1 施工工艺流程

（三）施工工艺流程

1、旧路调查与准备：对旧路结构状况进行详细调查，确定需要再生的深度和新集料的添加量等工艺参数。冷再生施工前应将旧路路面清扫干净，清除杂物、泥土等，并使用机械或人工将旧沥青路面面层铣刨清理干净。同时，将基层范围内明显的沉陷、坑槽进行填平处理，可采用与旧路基层相同或相近材料进行填补，保证后续施工的顺利进行。

2、材料添加：根据设计要求，人工或机械摊铺添加剂（水泥、新集料等），按设计添加量计算每平方米添加量，确保添加均匀。

3、摊铺整形：使用冷再生机对旧路面基层进行铣刨、破碎，并同时添加水就地进行拌和。拌和过程中随时检查深度及速度，以保证再生深度及破碎的混合料级配合理。含水量通常控制在 8%~10%之间，通过再生机的电子阀进行含水量喷淋的精确控制。

4、稳压、整形与碾压成型：采用压路机稳压后用平地机对路面进行刮平至设计高程。碾压按照先轻后重、先静后振的原则进行，先用 12t 以上双钢轮振动压路机进行稳压，然后采用 18t 以上单钢轮振动压路机进行振压，最后用 25t 以上轮胎压路机进行终压。通过不同阶段的碾压，使再生路面达到规定的压实度。

5、养生：碾压检测合格后及时采用土工布覆盖养生。养生时间一般不少于 7 天。

三、工程应用情况

近年来，泾川县在农村公路养护维修工程中大范围使用水泥稳定类基层冷再生技术，累计应用水泥稳定类基层冷再生技术的面积达到了 50000 平方米。重点在 X206 泾川至黄家咀子公路（太平坡段）、X310 泾川至麻武公路（王母宫山顶段）等路段应用，最终形成符合设计要求的水泥稳定碎石基层。

四、成本造价

水泥稳定类基层冷再生技术实现了旧路面材料的 100%利用，减少了材料运输、废弃处理等环节的费用，同时缩短了施工工期，经测算，相比传统挖除重铺工艺可节约造价约 40%。

表 1 农村公路水泥稳定类基层冷再生技术与传统技术对比

对比	传统方案1：挖除重铺	新方案：就地冷再生	效益对比
典型结构	现有路面基层整体挖除后重铺	使用冷再生机对旧路面基层进行铣刨、破碎，并同时添加水泥就地进行拌和	材料成本降低 > 80%
每平方造价	约 65 元/平	约 35 元/平	下降 > 40%
对老路利用程度	现有路面结构层整体挖除，未进行充分利用，废弃量大	老路基层保留利用，基本不产生废弃工程	废料产生降低 > 90%
封闭施工时间/每公里	40 天全封闭、开挖	10 天半封闭施工	下降 > 75%
施工难度	较大，需要做好各个环节的管理	较小，工期短，需要专业团队配合	——
施工噪音	大，尤其是基层挖除	较小	降低 > 80%

五、应用效果

（一）施工质量

从压实度检测结果来看，现场随机抽取的检测点压实度均达到设计要求的 98% 以上。路面平整度偏差平均值控制在 3mm 以内，满足相关规范要求。养生期结束后，再生混合料的无侧限抗压强度强度值均大于设计强度要求。

（二）应用效果

经过多年通车运行检验，应用水泥稳定类基层冷再生技术后的效果显著，路面裂缝、坑槽等病害得到有效治理，行车舒适性明显提高，再生路面基层结构强度得到增强，能够更好地承受车辆荷载，路面的使用寿命得到延长。同时，该技术实现了资源的循环利用，减少了对环境的污染，具有良好的社会效益和环境效益，与传统的养护维修方式相比，水泥稳定类基层冷再生技术在农村公路养护中展现出了良好的应用前景和推广价值。

“冷再生+固化剂”基层技术

甘肃省靖远县交通运输局

一、适用场景

“冷再生+固化剂”基层技术适用于多种场景，尤其在农村公路养护中具有显著优势。该技术在黄土高原、土质松软以及砂石材料匮乏的地区极为适用。该技术主要针对的公路病害类型包括各类沥青路面基层破损，通过冷再生和固化剂基层技术，可以快速恢复公路通行能力，提升路面结构强度，延长公路使用寿命。我市在该技术的推广中，西北民族大学路面科研团队给予了很大的技术支持。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

（1）旧路面材料：完全利用旧路面的沥青混凝土、水泥稳定碎石作为再生料，实现资源的循环利用。

（2）固化剂：选用环保型高强固化剂，其主要成分为多种无机化合物，能够与土壤发生物理化学反应，提高土壤的强度、稳定性和耐久性。固化剂的掺量通常根据土壤的性质和工程要求通过试验确定，一般为冷再生水稳料质量的 0.01%。

（3）水泥：一般选用 32.5 或 42.5 普通硅酸盐水泥，作为辅助固化材料，增强混合料的早期强度，掺量为冷再生水稳料质量的 4~6%。

（二）设备类型

主要设备有冷再生机、装载机、平地机、压路机、洒水车、水泥洒布车、碎石撒布车。

（三）工艺流程

“冷再生+固化剂”基层采用全深式就地冷再生同步摊铺方式进行。主要施工工艺流程为：施工准备→摊铺碎石→撒布水泥→洒水车掺固化剂→冷再生拌和→摊铺→碾压→养生。



图2 施工工艺流程

（四）技术要求

（1）材料要求。旧路面铣刨料的粒径应符合级配要求，碎石的塑性指数、含水量等指标应在规定范围内。

（2）施工要求。冷再生机的铣刨深度和拌和效果要满足设计要求，固化剂、水泥等材料的撒布量要准确。

（3）质量检测要求。对原材料、混合料的配合比、路面的压实度、平整度、弯沉值等指标进行定期检测满足要求。

三、工程应用情况

2025 年 4 月，在靖远县 X205 线吴家川至坝滩三级公路提质改造工程中，对 K15+500 ~ K16+000 段长 500 米试验段采用了 20 厘米厚全深式就地冷再生基层，设计水泥含量 5.0%，固化剂掺量 0.01%，摊铺面积 3500 平方米。通过实施该技术，达到了预期目的：使得基层 7d 无侧限抗压强度达到预期 2.5MPa 以上，具有较强的抗弯拉、抗渗、抗冻胀、抗翻浆能力，整体稳定性好，节约了建筑材料，工期缩短 30%，解决了弃渣环保处理和常规铺水稳基层路面抬高的问题。



图 3 现场作业图

四、成本造价

通过与常规的挖除旧油面铺筑水泥稳定基层工艺方案对比，节约了 85% 的铺筑材料，工期可缩短 30% ~ 40%，造价降低约 5% ~ 15%，优点明显，综合效益显著。

（1）材料成本。与传统的基层施工材料相比，“冷再生+固化剂”基层技术充分利用了旧路面材料和当地的资源，减少了对新砂石材料的采购，

每平方米的材料成本可降低 10-15 元左右。

（2）设备成本。主要设备与传统施工工艺所需设备成本相当。但由于该技术减少了材料运输等环节，在一定程度上降低了设备的使用成本。

（3）施工造价。综合考虑材料、设备、人工等成本因素，采用“冷再生+固化剂”基层技术的施工造价相比传统工艺可降低 5%-15%左右，经济效益显著。

五、应用效果

施工质量：经检测，路面基层的压实度达到 95%以上，平整度偏差控制在规范允许范围内。

应用效果：与周边未采用该技术养护的路段相比，采用该技术的路段使用寿命得到了有效延长，预计可延长 3-5 年。



图 4 基层抽样检查结果

第三篇 创新探索类

ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面技术

北京市交通委员会怀柔公路分局

一、适用场景

ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面技术适用于农村公路沥青及水泥路面的预防养护，以及路面封闭裂缝、抗滑处治、坑槽修补、车辙处治、麻面修复、泛油处治等。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工材料要求

ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面技术所需材料为高抗飞散高粘乳化沥青、满足较高硬度与耐磨性的玄武岩石料、水。

表 1 高抗飞散高粘乳化沥青技术要求

试验项目		单位	技术要求	试验方法
破乳速度		/	慢裂快凝	T 0658
粒子电荷		/	阳离子(+)	T 0653
筛上残留物		%	≤0.05	T 0652
贮存稳定性	1d	%	≤1	T 0655
	5d	%	≤5	
蒸发 残留物	含量	%	≥62	T 0651
	针入度	0.1mm	45-150	T 0604
	软化点	℃	≥75	T 0606
	延度(5℃)	cm	≥35	T 0605
	溶解度	%	≥97.5	T 0607
	弹性恢复	%	≥90	T 0662

（二）施工设备要求

ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面技术所需设备为稀浆封层车、压路机。稀浆封层车具有材料储存、计量、拌合、摊铺等功能，要求最大出料量不小于 3t/min，乳化沥青计量精度<1%，石料计量精度<3%。压路机要求为

5-30t 胶轮或 10t 钢轮压路机，要求具有良好的洒水效果，防止碾压过程中粘轮。

（三）人员分工要求

施工人员要求如下：项目经理 1 名、稀浆封层车司机 1 名、稀浆封层车操作手 2 名、压路机司机 1 名、工人 4 名。

（四）施工工艺



图 1 ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面施工工艺图

施工流程如下：

（1）拌合摊铺。在稀浆封层车中，将计量后的高抗飞散乳化沥青和石料进行连续式拌合，得到稀浆混合料，通过自带的摊铺箱按照设定厚度的稀浆混合料铺设在路面上。

（2）碾压。待稀浆混合料中的乳化沥青初步破乳后，通过压路机进行路面碾压，碾压遍数为 1-2 遍。

（3）开放交通。完成碾压后，即可开放交通。

三、工程应用情况

为有效提高路面的抗滑性，对原路面裂缝、麻面等病害进行处置，2024 年 9 月在北京市怀柔区怀昌路、怀长路应用了 ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面技术。



图 2 施工前路况

怀昌路采用厚度为 12mm 的 ARCP 罩面，施工路段长度 500 米，宽度 6.5 米，面积 3250 平方米，桩号为 K3+500~K4+000。



图 3 怀昌路施工现场图片



图 4 怀昌路通车后图片

怀长路采用厚度为 8mm 的 ARCP 罩面，施工路段长度为 500 米，宽度为 10.4 米，面积 5200 平方米，桩号 K9+900~K10+400。



图 5 怀长路施工现场图片



图 6 怀长路通车后图片

四、成本造价

每平方米造价约 35 元，与热拌薄层相比，ARCP 高抗飞散冷拌超薄罩面的成本可降低 50%左右，效果相当，具有突出的经济性优势。

五、应用效果

（一）工后检测结果

施工完成后，委托有资质的第三方检测机构对怀昌路和怀长路进行了第三方检测，结果如下表所示。

表 2 ARCP 现场检测结果

路段	摩擦系数（BPN）	构造深度（mm）
怀昌路K3+400上行车道	81	0.7
怀昌路K3+450下行车道	87	0.63
技术要求	一般 > 45	> 0.55

（二）跟踪观测结果

施工 8 个月后，返回施工地点跟踪观测。原路面病害比较严重，存在严重的网裂、平整度不足、局部车辙、抗滑不足等病害。施工后，网裂、抗滑不足、平整度不足也得到基本解决。

观测结论如下：

（1）整体外观与实施时基本无差别，无脱层、掉粒病害。

（2）路面构造情况保持良好，与修筑时一致。

（3）原路面约 70% 的路面存在明显的网裂，对比试验段标头位置的网裂病害，发现网裂并未反射至 ARCP 罩面，表明其抗裂性能较好。



图 7 跟踪观测情况

MS-3 型微表处技术在农村公路预防性养护中的应用

河北省东光县交通运输局

一、适用场景

MS-3 型微表处是国际稀浆封层协会（ISSA）和中国规范中定义的中粒式微表处类型，具有良好的封水、抗滑、耐磨耗和中等程度的抗车辙能力，是高等级公路预防性养护中应用最广泛、技术最成熟的级配类型之一。

该类型微表处能高效封闭宽度小于 5mm 的各类轻度至中度裂缝（温缩缝、干缩缝、轻度反射缝），防止水分下渗，保护基层。有效粘结表面松散集料，修复因沥青老化或磨损造成的麻面、脱粒。可改善原路面轻微的平整度，提供一层耐磨层，覆盖并保护老化沥青面层，延缓氧化硬化进程。显著提升路面摩擦系数（摆值 BPN），极大改善雨、雾天气行车安全性。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

1、改性乳化沥青：慢裂快凝型阳离子乳化沥青，常用 SBR 改性，固含量 $\geq 60\%$ ，储存稳定性（1 天） $\leq 1\%$ ，筛上剩余量（1.18mm） $\leq 0.1\%$ ，恩格拉粘度（25℃）3-30，性能稳定是基础。使用坚硬、耐磨、洁净的玄武岩、辉绿岩或优质石灰岩。砂当量 $\geq 65\%$ 是关键指标，确保洁净度。普通硅酸盐水泥（强度等级 ≥ 32.5 级）或消石灰作为填料。用量通常为 1.0-3.0%（占干矿料质量比），调节破乳速度，提高早期强度和水稳定性。根据施工时温度、湿度，可适量添加缓凝剂（高温、长运距）或促凝剂（低温、高湿、需快开交通）。

表 1 MS-3 微表处技术改性乳化沥青技术指标

指标	单位	要求	测试方法
筛上剩余量	%	≤ 0.1	T 0652
恩格拉粘度（25℃）	-	3-30	T 0622
蒸发残留物含量	%	≥ 62	T 0651
残留物针入度（25℃）	0.1mm	40-100	T 0604

指标	单位	要求	测试方法
残留物软化点	℃	≥ 57	T 0606
弹性恢复率（25℃）	%	≥ 80	T 0662
储存稳定性（1d）	%	≤ 1.0	T 0655
破乳速度	-	慢裂	T 0658

2、设备类型：核心设备为微表处专用摊铺车；辅助设备有路面清扫设备、洒水车、装载机、胶轮压路机用于初期辅助碾压，消除轮迹、提高平整度密实度，尤其在接缝处；配备交通管制设备标志牌、锥形桶、警示灯、旗手/安全员服装。

（二）工艺流程

1、病害处治：宽度≥3mm的裂缝必须预先灌缝处理，使用专用灌缝胶；局部修补：对小面积坑槽（深度<40mm）或严重破损处，应预先挖补修复。

2、彻底清扫：确保路面无泥土、杂物、碎石、浮尘和油污。必要时进行高压水冲洗并完全干燥。

3、预湿：摊铺前1-2分钟用洒水车雾状喷洒湿润路面。

4、微表处施工：将符合要求的混合料，按照设定比例送入拌合缸，摊铺车以匀速前进，混合料从摊铺箱后连续流出，在刮板刮涂作用下，均匀铺筑。混合料足够硬化时，开放交通。



三、工程应用情况

东光县在县乡农村公路探索应用 MS-3 型微表处进行预防性养护，取得了较好的效果。2023 年东光县农村公路养护工程对辛霞路、南吴路进行微表处施工，施工总里程 16.02 公里，路面宽度均为 9 米；2024 年东光县农村公路养护工程对 X806 南吴路、Y163 曲于路、Y162 辛金路进行微表处施工，施工总里程 20.224 公里，路面宽度均为 9 米。原路面为沥青

混凝土，普遍存在轻度网裂及宽度 2-5mm 的纵向、横向裂缝，表面松散、轻微麻面，抗滑性能显著不足，沥青老化明显。



图 1 东光县辛霞路微表处施工



图 2 东光县南吴路微表处施工

四、成本造价

在预防性养护最佳时机实施 MS-3 微表处，是优化有限养护资金、实现农村公路“好路精养”、保持良好服务水平的最具经济性的选择之一。其投资回报率高，尤其适用于路况中等偏下、以表面功能衰减为主的农村公路。自 2023 年以来，针对性解决农村公路最常见的裂缝、松散、抗滑不足问题，东光县开始引进微表处技术对县乡公路进行预防性养护工程施工，投入带来的性能提升，单平米造价减少 37.5%，有效阻止水分下渗和病害发展，通常可延长沥青路面使用寿命 3-5 年，推迟昂贵的大中修。

表 2 农村公路养护施工场景下 MS-3 微表处技术与传统技术对比

对比维度	传统工艺 1：中修罩面	传统工艺 2：封层罩面	MS-3微表处 技术	微表处 优势分析
工艺原理	铣刨旧路面+重铺热拌沥青，厚度 40mm。	先洒铺热沥青，再洒铺单粒径碎石，碾压成型，厚度 5-15mm。	改性乳化沥青+级配集料现场拌合摊铺，形成整体薄层结构，厚度 8-12mm。	微表处结构整体性更强，间层无分离风险
层间粘结性	铣刨面清洁度影响粘结，易出现层间脱离	依赖碎石嵌入沥青膜，粘结力弱	乳化沥青破乳渗透，与旧路面形成化学粘结	化学渗透增强粘结，抗剪切能力提升
抗滑性能	依赖面层石料	依赖沥青黏附碎石，存在两层界面，易脱粒	定向嵌挤，构造深度均匀	一体化成型，无脱粒、层间滑移风险。

对比 维度	传统工艺 1: 中修罩面	传统工艺 2: 封层罩面	MS-3微表处 技术	微表处 优势分析
防水密封性	新沥青层密封性好，但裂缝反射风险高	碎石间存在空隙，依赖沥青膜厚度	混合料致密填充裂缝，形成连续防水密封层	防水性显著更优，保护路基效果突出
施工可控性	需多设备配合，厚度控制较好但平整度依赖操作水平	人工洒布均匀性差，碎石覆盖率依赖经验	机械化连续摊铺，厚度、油石比可精准调控，摊铺平整度高	机械化施工、质量更稳定
开放时间	大于6小时	2-4小时	1-2小时	交通中短时间减少50%
抗变形能力	普通沥青拌合料，动稳定度不高	无改性措施，高温软化变形严重	聚合物改性沥青弹性恢复率 > 85%，抗车辙能力提升3倍	寿命延长40%以上
环保性	铣刨产生废料，热拌能耗高	热沥青施工烟雾大，噪音大，碎石撒布粉尘污染	常温施工，无沥青烟，噪音小，废旧料接近零产生	零废料、低排放，符合绿色养护标准
耐久性	4-6年	1-2年，碎石脱落导致失效	5-7年，延缓基层病害发展	全寿命周期内预防性养护效果最佳
全周期成本	单价高	单价相似，返修频繁	单价相似，返修率低	长期成本降低30%

五、应用效果

MS-3 型微表处技术在东光县农村公路的预防性养护中取得了显著成效。该技术高效解决了裂缝、网裂和抗滑性能严重不足等核心问题。其中粒式级配设计在封水性、抗滑性、耐磨性和施工难易性之间取得了良好平衡。MS-3 型以其成熟的工艺、较高的施工效率、优异的性价比和突出的应用效果和相对较低的综合造价和显著延长路面寿命的能力，特别适合我国农村公路养护资金有限的实际。

立合剂：渗透型自愈裂缝修复材料

山西省万荣县交通运输局

一、适用场景

立合剂是一种面向公路裂缝“深层病害难修复”痛点而研发的新型高效修复环保材料，特别适用于传统工艺难以彻底治理的深层裂缝、网裂交错带和早期疲劳破坏区域。该材料具备优异的流动性，可在无开槽、仅微加热处理后迅速渗透至裂缝内部，在结构微孔中完成嵌填固结与自愈性反应，从根源封堵水分通道、抑制裂缝扩展，显著改善传统养护“表面覆盖易脱落、深层病灶难治理”的工程难题。

本材料适用于各技术等级，土、石地质地基，山区、平原、丘陵等全部地形路段。在交通管控要求高、作业窗口受限的公路场景下，立合剂凭借其快速施工、深度修复与全天候适应能力，展现出卓越的工程应用效率和推广价值。

二、施工工况及工艺流程

立合剂具备高度流动性与强粘结性，可在不开槽条件下迅速渗入微细裂缝，完成深层嵌填与结构融合，尤其在密集网裂、交错裂缝区域修复效果显著。其工艺简便、适应性强，具备良好的现场适应能力。

（一）施工准备与资源配置

为确保养护质量与效率，现场施工配置通常包括：

设备简洁：主要依赖液化气罐、吹风机、喷涂枪、刮板等基础工具，不需要复杂的开槽灌缝设备；

人员分工明确：技术组负责制定修复方案与工艺指导，施工组按专业分工执行操作，安全组则确保作业区安全和应急响应；

材料适配性强：能在-10℃至+45℃范围内稳定施工，四季均可应用，特别适合秋冬早春等病害高发时段的养护需求。

（二）施工流程与关键工艺

1、现场检测与方案制定：依据现场裂缝形态与分布，明确施工区段

并制定材料配比与覆盖策略，兼顾修复强度与通行效率。

2、裂缝清理：使用铁钩和吹风设备将裂缝内杂质和松散物清除，确保立合剂与原路面良好结合。清理后的表面应干燥、洁净、无油污。

3、材料加热与搅拌：将材料置于液化气火源加热（夏季控制在 120℃ 左右，冬季约 150℃），加热同时用金属棒搅拌均匀，以提升流动性与渗透深度。

4、裂缝喷涂/刮涂：

a、喷涂法：利用 60° 扇形喷嘴进行雾化喷涂，确保覆盖均匀且材料充分进入裂缝内部，厚度控制在 1~1.2mm；

b、刮涂法：将材料倒入病害区域后用长柄毛刷或刮板均匀涂抹，厚度不超过 1.5mm，要求面层平整、粘结饱满。

5、石屑覆盖：裂缝宽度 < 10mm，撒布 0~3mm 石屑或机制砂；裂缝宽度 > 10mm：使用 0~3mm（70%）与 0~5mm（30%）的混合石屑，形成 5~10mm 厚保护层，增强抗碾压能力。

6、开放交通与碾压：待材料表层固化后可直接开放通行，车轮碾压进一步促进材料与病害结合，形成密实修复结构。

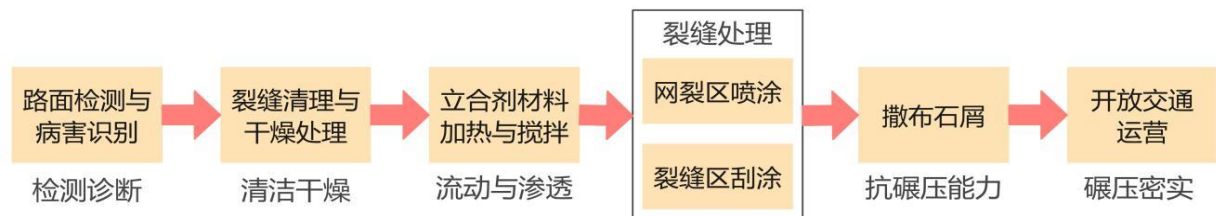


图 1 立合剂典型施工流程图

三、工程应用情况

材料成功应用于万荣县张高线（X808）河津界至里望段预防养护工程，该段路段全长 5600 米，宽 8 米。养护完成后路面状况指数（PCI）和综合评价指数（PQI）衰减缓慢，平整度标准差控制在 $\leq 1.2\text{mm}$ ，有效抑制了水分侵蚀与热胀冷缩导致的粒料脱落、裂缝复发。有效提升路面承载能力和沥青路面的使用寿命，阻止水侵蚀破坏，经处置后的病灶不会因热胀冷缩等因素引起粒料脱落、裂缝重生等情况，提高了公路通行能力和服务水平。

经实际运行验证，立合剂不需要机械设备和大量人力投入，凭借其无需开槽、施工便捷、渗透性强以及环保等优势，实现了对裂缝区域的快速填充与结构嵌合，显著提高了修复效率与操作灵活性，为县乡公路的网裂病害修复提供了高效、环保、可推广的解决方案。



图 2 现场作业

四、成本造价

立合剂作为一种集材料性能与施工效率于一体的裂缝修复技术，显著优化了公路养护的整体投入结构。实测数据显示，在处理龟网裂缝等常见病害时，其单位面积修复成本较传统开槽灌缝、热喷密封等传统工艺节约 40%~50%，具备良好的经济适用性。

其“无需开槽+快速封闭+即时通车”的特点，大幅减少大型机械依赖与养护工期，降低了人工与交通组织成本。作为兼具高性价比与全周期

效益的新材料方案，立合剂为构建资源节约型、生态环保型公路养护高质量发展模式提供了可复制推广的实践样板，也为黄河流域农村公路“低投入、重质量”养护体系建设奠定了坚实基础。

五、应用效果

万荣县农村公路养护技术以新技术、生态化修复为特色，形成了“预防性养护+大中修工程”相结合的技术体系。通过新型材料的利用、路长制管理等创新手段，实现了养护成本降低、质量提升、效益倍增的目标，为黄河流域农村公路养护提供了可复制的典型案列。

从跟踪数据来看，路面技术状况指数（PQI）呈稳定趋势：施工前为 77.86，施工后升至 86.93，一年后为 84.25，至两年后为 82.71，且优良中等路比例始终保持在 90%以上。对比施工前后的病害演变过程发现，立合剂在不开槽、低温条件下施工简便，材料通过自流渗透特性有效嵌填裂缝区域，形成连续致密的弹性填充层。表面平整、结构稳定，后期未见脱落、回裂、老化等常见二次病害。其在高温重载和低温收缩等极端环境下仍保持良好的贴合性与柔性缓冲能力，有效抑制热胀冷缩引起的裂缝扩展与反复破损，展现出良好的即时修复效果与中长期耐久表现。





图 3 应用效果展示

总体来看，立合剂在实际应用中通过“深层嵌填+弹性自愈”机制，显著提升公路结构完整性与运行稳定性，尤其在病害密集、施工窗口紧张、传统工艺易失败的场景中，体现出其技术先进性与推广适应性，是当前公路养护中兼具效率与效果的优选解决方案。

固化土技术在养护工程中的应用

内蒙古自治区巴彦淖尔市临河区交通运输局

一、使用场景

1、原材料受限：因地理条件受限公路附近缺乏碎石、砂砾等筑路材料，或因环保要求无法在项目区附近开采筑路材料。

2、土质不良：项目区地下水位偏高，土壤中的有机质含量偏高等因土质原因造成的路基的承载力偏低。

3、车辆重载率高的农村公路：各类施工装料车辆多从农村公路绕行躲避执法部门检查，造成农村公路严重损坏，路基沉陷、翻浆的病害时有发生，采用固化土技术处置路床能有效提高路基强度。

二、施工工况及工艺流程

（一）固化土混合料要求

1、固化土无侧限抗压强度要求

固化土试件成型后，经养护 7d 龄期的无侧限抗压强度应符合下表的规定。固化土无侧限抗压强度试验方法应符合现行行业标准《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG E51 的有关规定。

表 1 公路固化土无侧限抗压强度（MPa）

类别	结构层	荷载等级	7d无侧限抗压强度
水泥固化土	基层	中、轻交通	2.5
	底基层	中、轻交通	1.5

2、固化土抗冻性指标

项目区属于严寒地区，外加剂中应加入防冻剂，并按现行行业标准《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》JTG E51 的有关规定进行抗冻性试验。固化土的冻融试验条件及抗冻性指标应符合下表规定。

表 2 固化土的冻融试验条件及抗冻性指标

地域分类	冻融试验条件	试件尺寸 (mm)	试件养护期 (d)	冻融循环 (次)	强度损失 (%)	质量损失 (%)
严寒地区	-30±1℃； 20±1℃	6150×150	90	10	<20	<5

3、压实度指标

公路固化土基层及底基层压实度指标应符合下表的规定。

表 3 公路固化土压实度(%)

结构层	压实度
基层	≥ 97
底基层	≥ 93

(二) 固化土施工流程

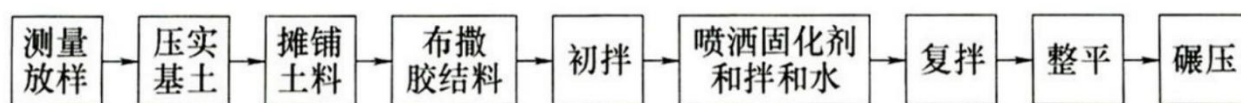


图 1 路拌法施工主要工艺流程示意图



图 2 备土整平



图 3 机械拌合白灰或者水泥



图 4 洒水车中稀释土壤固化剂



图 5 固化土初压、整平、碾压



图 6 固化土二次整平、碾压



图 7 土工布洒水养护

三、工程应用情况

该技术在修建农村公路项目中应用，处置路基层部沉陷翻浆段落 265m，养护设计中维持原平面位置不变，重新调整纵断面，并根据弯沉检测数据及土壤检测数据确定软弱土路基段落，项目处置为将全线原有的砂砾功能层替换为 4%水泥固化土底基层，底基层的 7d 无侧限抗压强度不小于 1.5MPa。

四、成本造价

1、就地取材：在路基上直接就地取土施工，不必再使用运输车远距离运输沙、石、水等材料，替代了传统筑路材料，节约材料费、大量的运输费用和人工费，与传统筑路材料和工艺相比，可降低成本 20% 左右。大幅降低了对设备和车辆的使用率，光在设备投入方面即节省大量投资，而且使用原有筑路工具不必再添新设备，尤其适用于运输费用高、车辆费用高的地区，如考虑征地挖土运输等费用则整体费用降低巨大。

2、用量很低：土壤固化剂使用量低，如此低的添加量即可达到非常好的公路抗压、抗水、抗冻效果，效益明显。根据等级要求及公路土质情况决定确定胶结材料添加种类，配合合适的胶结材料使用后其强度可大幅增加。

3、水稳定性好：解决了透水问题，路基高度可整体降低，可节省大量的人工、工期、土方、沙石、水泥、石灰和其他材料。加入固化剂后公

路有很好的防水性，不易因雨季造成公路破坏，延长公路的使用时间，减少维护时间。

五、应用效果

该技术在实施后有效的处置了地基承载力不高的土质段落，避免了碎石、砂砾等材料缺乏造成的施工延误。且在项目造价有限的情况下达到双基层的承载力效果。在项目实施完成后检测路面弯沉值较其他未处置的段落指标更好。



图 8 现场路基完工情况



图 9 后续追踪弯沉检测

结合该路段通车一年后重新测量弯沉值结果显示，该路段的路面弯沉值更低。路基强度更高。路况整体维持较好。

交叉口 SST 超强韧沥青混合料车辙处理技术

江苏省昆山市公路事业发展中心

一、适用场景

昆山市农村公路交通量普遍较大，重载车辆多，相当部分路段处于特重交通等级。因此，在农村公路路面平交口位置，车辙病害较为突出。且由于流量较高，保通压力大，能够为公路进行养护而中断交通的时间极为紧张。在此背景下，昆山市采用了 SST 超强韧沥青混合料对具有上述特点（荷载重、流量大、车辙严重、无法长时间中断交通）的公路平交口进行了专项处理。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料组成

SST 超强韧沥青混合料，主要材料包括：SST 超强韧沥青、M1 易密实剂、玄武岩纤维、玄武岩或石灰岩等。SST 超强韧沥青具有极强的高温抗车辙能力，其抗车辙因子 $G \cdot \sin\theta$ 为 PG76-22 改性沥青的 3~4 倍，配合玄武岩纤维的使用，使沥青混合料的高温稳定性进一步提高。M1 易密实剂为液体添加剂，随沥青一并加入，起到提高沥青混合料施工和易性、提升压实度，延长施工工作窗口的效果。

（二）生产工艺

采用常规热拌改性沥青混合料生产工艺，设备、人员、生产工艺与常规热拌改性沥青混合料施工完全一致。拌合设备即采用常规的 4000 型或 3000 型拌合机。沥青加热温度 170~180℃，混合料出厂温度 175~185℃，超过 190℃ 则废弃，运输至现场温度不低 165℃。生产 SSTSUP-20、SSTAC-20、SSTAC-13 时，添加玄武岩纤维。生产 SSTSMA-13 时，则仍然使用木质素纤维，无需使用玄武岩纤维。

（三）施工工艺

前场施工采用常规的摊铺机、胶轮压路机、双钢轮压路机等。根据混合料级配类型按照相应工艺进行施工，均为常规工艺。初压开始温度不低

于 140℃，复压温度不低于 120℃，终压结束温度不低于 100℃。

（四）施工过程

一是铣刨原路面，将车辙严重的交叉口路面面层全部铣刨。

二是后场混合料生产及运输。

三是撒布粘结层并进行沥青摊铺，将面层整体替换为 SST 超强韧沥青混合料。中下面层采用 SSTSUP-20 或 SSTAC-20，上面层采用 SSTSMA-13。

4cm SMA-13	4cm SSTSMA-13
6cm AC-20	6cm SSTSUP-20
8cm AC-25	8cm SSTSUP-20
40cm 水稳碎石基层	40cm 水稳碎石基层

图 1 施工过程（结构层施工前后对比）

三、工程应用情况

该技术于 2021 年 10 月应用于昆山市 X204 江浦路—X102 前进西路交叉口，该交叉口车流量极大，重载车辆多，属于特重交通等级，几乎每年都需对该路段部分车道进行铣刨重铺。本次工程计划对车辙严重的双向直行车道进行处理，长度约 100m 单车道，总施工面积约 1800m²。

施工前该路段车辙严重，车辙深度最大已接近 60mm，并出现了较多的推挤、拥包现象，行驶质量差，存在明显的安全隐患。



图 2 施工前公路情况

原路面结构为三层“4cm+6cm+8cm”结构，施工时先铣刨 18cm 厚面层全部，随后撒布粘层油之后，开始进行面层的逐层摊铺，将面层整体替换为 SST 超强韧沥青混合料。

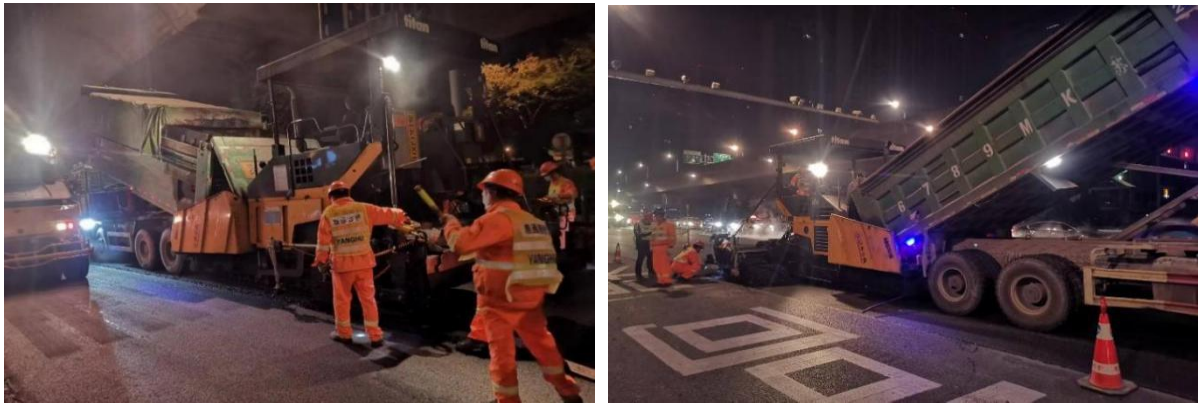


图 3 作业过程

四、成本造价

表 1 SST 超强韧沥青混合料与传统技术对比

对比指标	传统方案：常规热拌改性沥青混合料	新方案：SST 超强韧沥青混合料	效益对比
技术名称	常规热拌改性沥青混合料	SST 超强韧沥青混合料	—
材料成本	4cm 厚 SMA-13	4cm 厚 SST SMA-13	增加 40%
使用寿命	基准值（设为 1 倍）	≥3 倍传统方案寿命	提升 200% 以上

对比指标	传统方案：常规热拌改性沥青混合料	新方案：SST超强韧沥青混合料	效益对比
全寿命周期成本	基准值（按单位年限成本计算）	单位年限成本降低约53%	显著降低
施工工艺	常规铺装工艺	常规工艺	持平
占道施工时间	常规时长	占道时间短	减少交通干扰
养护难度	常规维护	难度大大降低	显著降低维护成本
社会效益	常规影响	减少施工占道、降低养护频率	提升公路通行效率，减少社会干扰

五、应用效果

该工程实施后，经过三年多的持续跟踪观测，检测数据如下：

表 2 相关检测数据

检测时间	上行方向车辙深度（mm）		下行方向车辙深度（mm）	
	平均值	极值	平均值	极值
2021.11	1.5	3	1.83	3
2022.3	2	4	2.2	4
2022.5	2.45	5	3	5
2022.8	2.95	6	3.3	5
2023.2	3.65	6	4.6	7
2023.6	3.75	6	5.27	8
2023.12	4.3	7	5.57	9
2024.3	3.55	6	5.13	10
2024.7	3.85	7	5.5	10
2024.12	4.35	7	6	10

由上述数据可知，该路段车辙深度的发展在 3 年内较为稳定，车辙深度始终维持在较低水平，截至 2024 年 12 月底，最大车辙深度达到 10mm，平均车辙深度维持在 4~6mm，年均增长速度不超过 1mm。目前路段行驶质量仍然较好，无安全隐患。

SMF 自修复免维护伸缩缝灌缝技术

江苏省昆山市公路事业发展中心

一、适用场景

伸缩缝灌缝材料可广泛应用于桥梁、涵洞、隧道、公路及其他建筑构件的伸缩缝、沉降缝等场景。在这些场景中，该材料的填充在不影响结构产生原本应有变形的情况下，能解决伸缩缝堵塞问题，保证伸缩缝有效功能；还能解放定期清理养护工作，节省养护成本并保障养护工人安全；其阻尼功能可减缓型钢振动、延缓断裂；阻水功效能有效阻止雨水渗入支座和桥台（墩），增加支座及桥梁下部结构耐久性。

二、施工工况及工艺流程

（一）工程概况及工作原理

SMF 灌密封胶适用于桥梁上普通型钢伸缩缝、模数伸缩缝等具有橡胶条的伸缩缝，如常见的 GQF-C 型、Z 型、L 型、F 型及 MZL 型伸缩缝，其基本原理为利用 SMF 灌密封胶将其伸缩缝缝内空间填满，胶体在固化的过程与两边型钢形成良好的粘合力，且固化后的胶体有着优异的柔软性能不影响伸缩缝的正常伸缩功能，由于胶体的封闭，对于伸缩缝还具有防水、减震、保护橡胶条等功能。

（二）材料及设备

表 1 SMF 灌密封胶公路桥梁伸缩缝灌缝施工材料

序号	材料名称	数量及使用功能
1	SMF 灌密封胶	本产品为 A\B 桶装，每桶 1600ml，可浇筑 1.5m
2	粘合剂	粘合剂刷在型钢表面，增强型钢与胶体之间粘结
3	橡胶颗粒	利用橡胶颗粒铺底，不影响功能，减少胶体用量
4	封层剂	刷在浇筑完成的胶体上，对胶体起到保护作用



图 1 灌密封胶



图 2 橡胶颗粒

表 2 SMF 灌密封胶公路桥梁伸缩缝灌缝主要施工设备

序号	材料名称	数量及使用功能
1	胶枪	根据工作量需要而定
2	空压机	为胶枪提供压力
3	强力吹风机	根据工作量需要而定，清理伸缩缝缝内垃圾
4	砂轮机	对型钢局部锈蚀部位进行打磨
5	发电机	提供上述设备功能
6	A/B胶冷拌管	与胶桶配合使用



图 3 灌密封胶枪

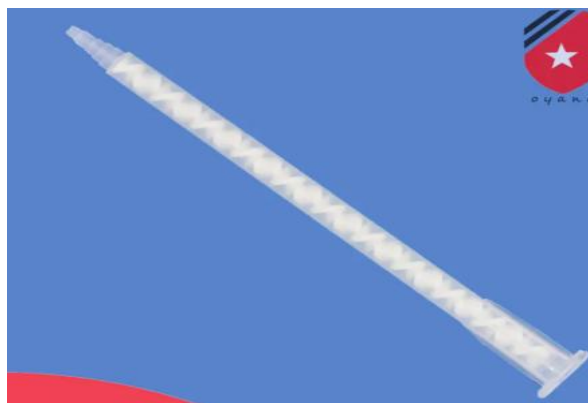


图 4 灌密封胶 A/B 胶冷拌管

(三) 施工工艺

本施工工艺简单易行，质量可控，其步骤主要为清缝、灌缝、刷保护层等几个步骤。具体工艺流程见图 5。

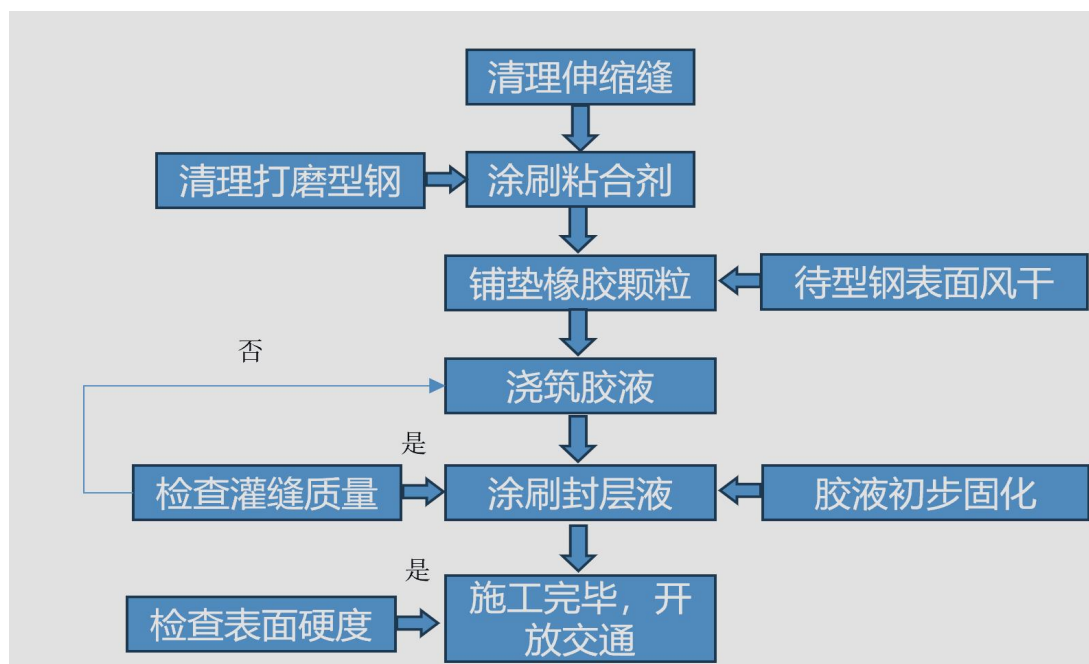


图 5 施工工艺流程图

施工的主要方法及要求: (1) 用钩子松动伸缩缝中垃圾, 用高压风机清理缝内垃圾等杂质, 如原伸缩缝止水带破损, 可临时性修复。(2) 伸缩缝型钢内侧用角磨机或激光进行除锈; (3) 伸缩缝型钢内侧涂刷粘合剂, 待表干后用橡胶颗粒均匀填充伸缩缝下部三分之二深度, 预留三分之一深度, 且预留深度不小于 2cm。(4) 维护现场卫生状况, 用专用 AB 桶气枪浇筑填缝料 (气枪压力 0.1~0.2 兆帕), 填缝料浇筑略低于伸缩缝上表面 1~2mm; 浇筑完成 10 分钟可涂刷一遍封层, 厚度 1~2mm。(5) 固化时间 30~60 分钟即可通车。

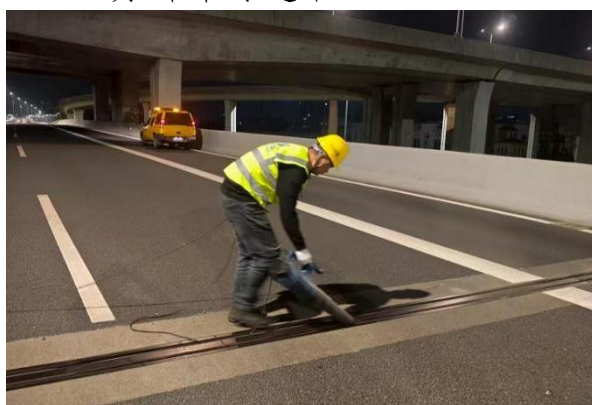


图 6 垃圾清理



图 7 除锈



图 8 涂刷粘合剂、铺橡胶颗粒



图 9 浇筑填缝料



图 10 完成作业

（四）施工要点及操作注意事项

伸缩缝型钢内侧涂刷粘合剂时,用干净的抹布擦去伸缩缝底部残留的粘合剂;伸缩缝浇筑厚度必须大于 2cm;浇筑过程如需暂停,暂停时间不宜超过 3min;浇筑过程气压不宜过大;首次使用的混合管,开始加压时混合管出料嘴向上,待料充满管体方可浇筑;封层涂刷应在胶体初固后涂刷,涂刷可涂 1~2 层,厚度约 1~2mm;请勿在雨雪天气施工,施工过程切勿洒水。

三、工程应用情况

2025 年昆山市在江浦路 (X204)、萧林路 (X351) 上开展了伸缩缝灌缝技术专项处置试验,试验段长度总计约 125m。试验方案对原伸缩缝型钢开展清理、打磨后,灌注 SMF 灌密封胶,改造后的伸缩缝区域,通行更加舒适,噪声相对更低,并延长了维护周期。

四、成本造价

表 3 无缝伸缩缝灌缝技术与传统技术对比

对比指标	传统方案：传统伸缩缝维护	新方案：无缝伸缩缝灌缝	效益对比
典型工艺	定期清理冲洗伸缩缝堵塞物；对于胶条破损处进行修补或整条更换	采用无缝伸缩缝材料，对传统伸缩缝胶条处进行灌缝密实	——
维护频次	一月一次进行清理	一次施工，后期免维护	降低近 100%
每延米造价（含维护）	约 400 元/米	约 350 元/米	下降约 12%
平整度	差	基本与路齐平，平整度好	行程舒适性提升 > 40%
降噪性能	无	较好、有效吸收振动	降噪 > 2dB
密封性能	胶条外露、易破损导致漏水	与胶条表面完全密封、不漏水	阻水密封性 > 50%
施工难度	大，拆除原有胶条	较小，工序简单	——
施工安全	频繁占道施工	一次施工长效使用	安全性能大幅提升

五、应用效果

该技术应用有效降低长期养护费用，具体如下：（一）节省日常清理伸缩缝的费用，避免清理伸缩缝所发生的交通安全事故；（二）该材料具有保护橡胶条的作用，避免橡胶条的频繁更换费用；（三）该工艺具有防止雨水从伸缩缝渗入桥台或桥墩，提高下部结构和支座的耐久性；（四）该工艺具有阻尼作用，减缓伸缩缝型钢的断裂及异响等问题。

3D 变量铣刨技术

浙江省丽水市交通运输局

一、适用场景

随着“四好农村路”建设持续推进，农村地区交通运输需求日益增长，对农村公路行车舒适性要求也逐步提高。然而，农村公路技术等级相对较低，平整度指标往往较差，传统的铣刨加铺处治方式对于平整度指标控制又存在较大的技术难度，难以同时满足养护处治经济性和路况提升舒适性的要求。为此，丽水市交通运输部门积极探索 3D 变量铣刨新技术应用，凭借其毫米级铣刨深度控制能力，实现“按需铣刨”，较传统等厚铣刨具有两大优势：一是提升施工效率，传统等厚铣刨回铺需铣刨、回铺两道工序，3D 变量铣刨仅一道工序，铣刨完成即可通车，施工时间缩短约 70%，减少对交通的影响，提高通行效率；二是绿色环保的优势，3D 变量铣刨技术根据路面实际精准控制铣刨深度，能有效减少铣刨废料和加铺厚度，降低资源消耗与环境污染，符合绿色交通发展理念。具体有以下两种应用场景：

1、主要病害为平整度较差的路段精铣刨后无需加铺。针对平整度不足、轻度车辙、抗滑性能下降、拥包等早期病害，3D 变量铣刨技术凭借毫米级精准铣刨能力，可按需铣削受损路面，精准去除表层病害。施工后无需长时间封闭交通，能快速恢复路面平整度与抗滑性能。

2、一般病害路段精铣刨后进行薄层罩面。修复网裂、坑槽、重度车辙等严重病害修复后，应用 3D 变量铣刨技术自动识别路面高低差，减少铣刨量，最大限度保留原有路面结构强度，精准调平路面，在此基础上实施薄层罩面，在降低材料消耗、提升经济性的条件下，有效保证路面平整度指标。

二、施工工况及工艺流程

3D 变量铣刨技术主要施工流程图见图 1:

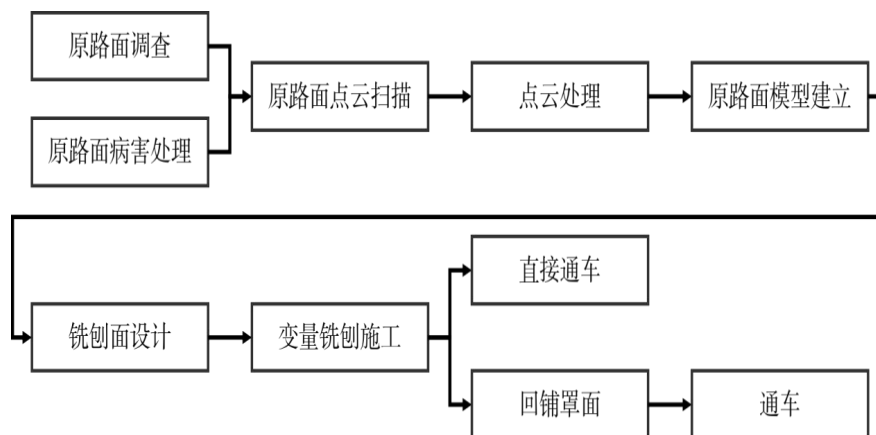


图 1 3D 变量铣刨技术主要施工流程图

（一）智能数据采集系统：高效路面数据采集“侦察兵”

在确定采用该技术后，通过在常规车辆上安装激光扫描系统，高效采集包含高程与位置信息的三维点云数据，精准还原原始路面的微观起伏状况。系统平均扫描速度达 60-80km/h，单次扫描宽度超 3.75 米，点云密度最高可达 2mm×1mm，每平方米可采集近万个空间坐标点，同时完成数据的高速存储，并对数据进行智能预处理。相较传统人工检测手段，该技术的数据采集效率提升 20 倍以上。为后续云端数据处理及铣刨方案的智能化设计提供了高精度、全要素的数据基础。



图 2 路面扫描系统组成

（二）云端数据处理平台：智能铣刨方案设计“大脑中枢”

通过将预处理后的点云数据导入专业设计软件，构建高精度三维路面数字孪生模型，实现纵断面与横断面的全要素设计。根据路面高程差和公路状况设计不同深度的铣刨轨迹，通过算法进行曲面平滑处理，决策形成

不同路段的铣刨深度施工方案。该技术彻底改变传统“等厚铣刨+经验判断”的粗放模式，通过数字模型驱动实现“按需铣刨”，构建从数据建模到施工方案的智能化体系。

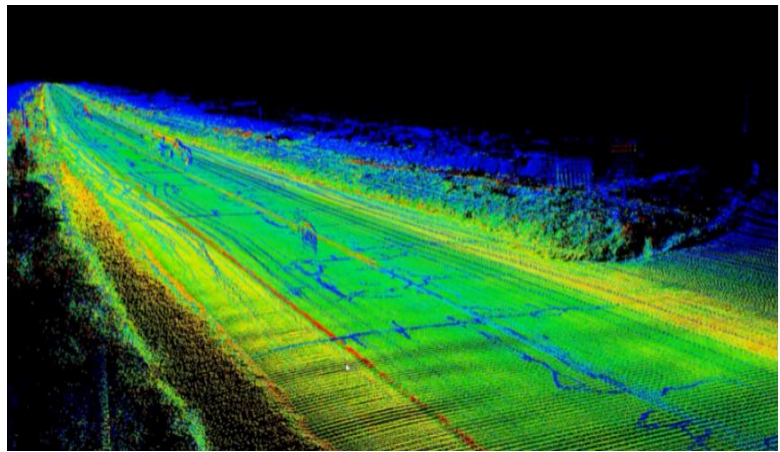


图 3 点云处理软件

（三）自动化施工控制系统：精准铣刨作业施工“智能手臂”

通过在传统铣刨机上安装 GNSS 高精度定位系统和铣刨鼓附近安装高精度传感器，结合提前录入系统的铣刨机的型号及桩号、三维坐标及铣刨深度等设计参数，施工过程中控制模块根据设计模型自动计算当前位置的铣刨深度，通过液压系统精确控制铣刨鼓升降，尤其在陡坡、弯道等复杂路段，传感器实时感知路面坡度变化，动态调整铣刨鼓姿态，而传统等厚铣刨依赖人工操控，无法处理变坡度路段。该系统通过“数字设计-智能执行”的一体化模式，将铣刨效率提升 30%以上，构建起从数字化设计到智能化施工的完整技术闭环。

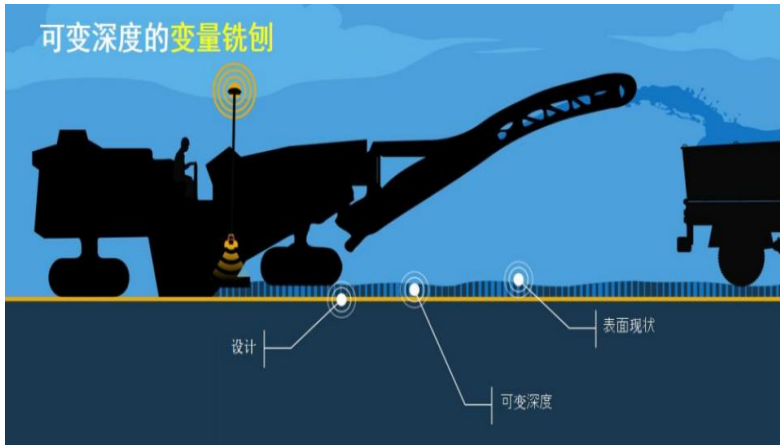


图 4 变量铣刨控制子系统作业示意图

三、工程应用情况

在丽水市莲都区县道桃碧线的工程实践中，3D 变量铣刨技术展现出强大优势。该路段原路面存在轻微的车辙、拥包病害，施工中选取行车道 600 米作为变量铣刨后直接通车段，同时设置 200 米传统等厚铣刨回铺路段做对比。



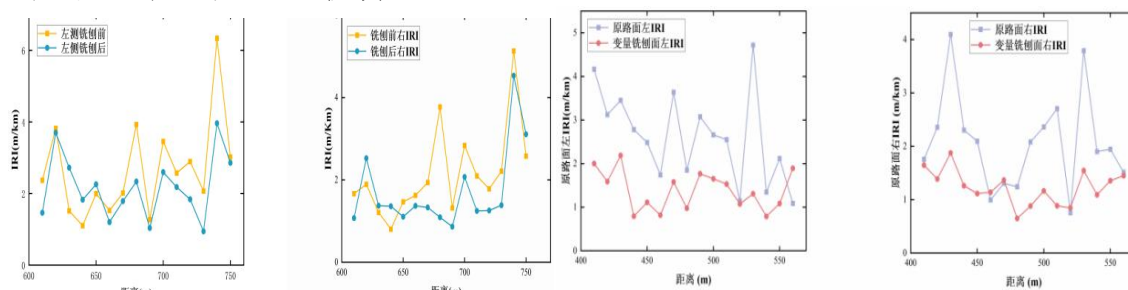
图 5 施工现场照片

四、成本造价

对于主要病害为平整度较差路段的养护处治，传统铣刨回铺成本每平方约 75-80 元，采用 3D 变量铣刨技术实现平整度提升而无需加铺，每平方单价仅 15-20 元，成本降低约 80%。对于一般加铺处治路段，采用 3D 变量铣刨技术后可减少加铺厚度，养护综合成本降低约 10%，且平整度指标控制方面具有更好效果。

五、应用效果

该项目实施后，对采取 3D 变量铣刨与传统铣刨的两条路段进行了平整度比较。3D 变量铣刨后 IRI 指标降幅超 35%，路面平整度显著提升；而传统铣刨对照组 IRI 指标降幅仅约 15%，且波动较大，3D 变量铣刨在改善路面平整度方面优势明显。



(a) 传统铣刨前后 IRI 指标对比 (b) 3D 变量铣刨前后 IRI 指标对比

图 6 传统等厚与 3D 变量铣刨铣刨效果对比

DTO 高延弹超薄罩面技术

浙江省丽水市莲都区公路管理中心

一、使用场景

DTO 高延弹超薄罩面是一种采用超粘非乳化不粘轮粘层油、高粘高延弹特种改性沥青、独特静音型混合料级配铺筑的，具有高韧、阻裂、抗滑、降噪特点的超薄罩面技术，厚度为 1.2cm-2.5cm。

该技术尤其适用于桥梁、隧道、穿城镇路段路面的养护处治，可有效解决标高受限、较少恒载等养护难题，也适用于水泥混凝土路面“白改黑”改造、沥青混凝土路面预防养护。

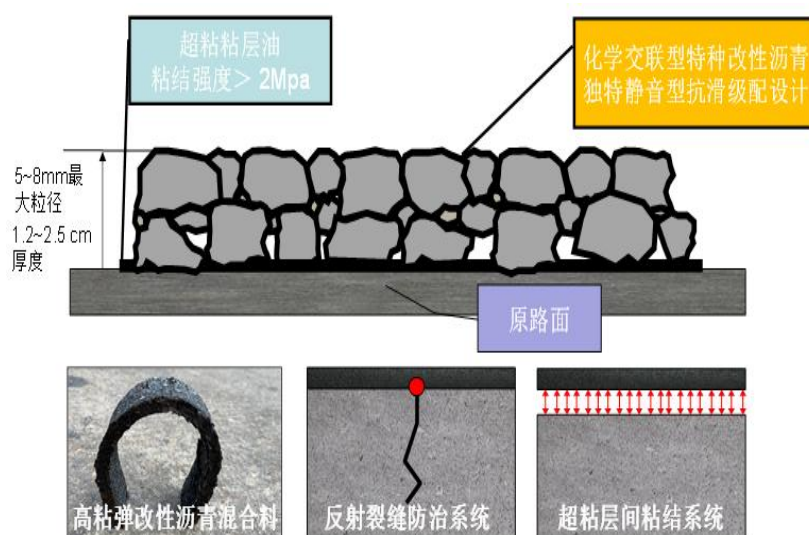


图 1 原理示意图



图 2 典型外观

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

1、高延弹化学交联型沥青

选用当地已有沥青，一般使用普通改性沥青作为 DTO 高延弹沥青改性剂的母质沥青，通过干法直投外掺 DTO 高延弹沥青改性剂制备成高延弹化学交联型沥青。具有良好的三维改性网络，高低温性能出色、高韧阻裂等特点。

2、超粘非乳化不粘轮粘层油

DTO 超薄罩面的层间粘结系统采用特种超粘非乳化粘层油。

表 1 粘层材料性能指标

指标	单位	要求	测试方法
粘度,25℃	MPa.s	50-150	T0625-2011
储藏稳定性试验,24h	%	≤0.5	T0656-1993
干燥时间,25℃	h	表干≤1.5	GB/T16777-2008
		实干≤7	
筛上剩余量试0.3mm,25℃	%	≤0.1	T0652-1993
粘结强度	MPa	≥1.0	AASHTO T361-16

3、超粘韧克裂胶

DTO 超薄罩面实施厚度仅 1.5cm-2cm,需要采用超粘韧克裂胶进行薄层加铺时原路面裂缝处治,克裂胶在冬季低温条件下提供足够的抗拉伸能力,承受温缩造成的位移与应变,同时良好的延韧性使得应力在克裂胶中得以吸收与消散,抵抗反射裂缝。

（二）工艺流程

DTO 超薄罩面采用传统异步摊铺方式进行, 施工流程包括: 原路面处理-特种粘层油洒布-拌合站出料(添加 DTO 高延弹改性剂)-混合料运输-传统摊铺机异步摊铺-压实-开放交通, 如下所示:



图 3 实施工艺流程

三、工程应用情况

2024 年 5 月，在莲都区“四好农村路”提升改造项目一上李线大中修工程中，针对 K7+490-K7+890 段 400m 过村段采用了 DTO 高延弹超薄罩面，旨在解决过村段标高受限及排水降噪问题。具体施工方案如下：首先对原水泥路面进行面板局部维修。在完成水泥面板局部维修后，于裂缝及水泥板接缝处铺设 50cm 宽自粘式高强复合布，随后撒布超粘非乳化不粘轮粘层油，最后摊铺 2cm 厚的 DTO 高延弹超薄罩面 2866.50m²。



图 4 施工现场

四、成本造价

将 DTO 高延弹超薄与常规水泥路面处治方案进行对比：

表 2 处治方案对比

对比	传统方案1：挖除重建	传统方案2：白加黑	新方案：2cm超薄层
典型结构	现有路面结构整体翻除后新建	原水泥路面处治后加铺沥青混凝土	原水泥路面处治后加铺2cm超薄沥青
使用年限	使用年限10年	使用年限>7年	使用年限>5年
老路利用程度	现有路面整体翻除，未进行充分利用，废弃量大	老路结构保留利用，基本不产生废弃工程	老路结构保留利用，基本不产生废弃工程
施工时间	60天全封闭、开挖	10天全封闭施工	2天半封闭施工
路面功能性	无，采用石灰岩，路面1-2年后泛白	无，采用石灰岩，路面1-2年后泛白	采用全玄武岩或辉绿岩及高沥青含量，抗滑降噪
施工影响	较大，需要做好各个环节的管理	适中，需要做好各个环节的管理	较小，工期短，需要专业团队配合
施工噪音	板块破除噪音大	较小	较小

通过对比可知，DTO 超薄罩面可以实现快速施工，最快可降低施工工期 80%；此外在最大限度利用旧路资源（无废弃工程）的同时显著提升路面抗滑降噪功能。综合费用较传统处治方案下降在 40%以上。

五、应用效果

项目改造前，过村段受标高限制，路面改造方案选择有限，且水泥砼路面在排水和降噪方面表现不佳。改造后，有效解决标高受限问题，且在排水和降噪方面取得显著成效。



图 5 追踪调查结果

结合该路段通车一年后调查结果显示，该路面未出现反射裂缝及车辙等病害，防水效果良好，路况整体维持较好。

水泥路面微裂均质化再生处治技术

浙江省宁海县交通运输局

一、适用场景

水泥路面微裂均质化再生处治技术是创新的采用水泥路面智能声波检测仪与落锤式强度检测仪精准定位路面结构脱空与松散位置，结合地聚合物注浆加固、智能微裂再生等成套技术，对旧水泥路面进行微裂均质化处理后加铺薄层沥青面层，实现水泥路面“白改黑”的经济耐久。与水泥路面共振碎石化技术相比又最大化保留利用了旧水泥板的残余强度，且施工噪音较小，具有“承载能力强、防反射裂缝彻底”的优点，适用于各技术等级水泥混凝土路面的“白改黑”改造。

二、施工工艺流程

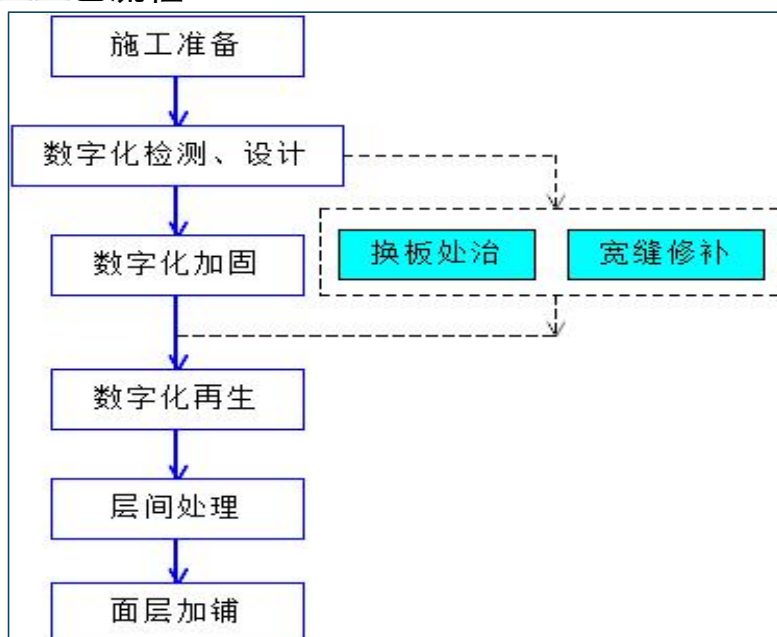


图 1 微裂均质化再生处治技术流程图

1、数字化检测、设计

基于公路维护数字化可视系统，快速、便捷地查找到路表病害点，在病害位置采用水泥路面智能声波检测仪和路用 FWA 智能检测仪（FWA）进行专项检测，对路面结构组成、结构层完整性、承载能力等技术指标进

行科学评定，进行地聚合物注浆处治方案数字化设计，精准定位导航至公路结构缺陷位置，进行地聚合物注浆加固处治。



图 2 数字化现场采集过程

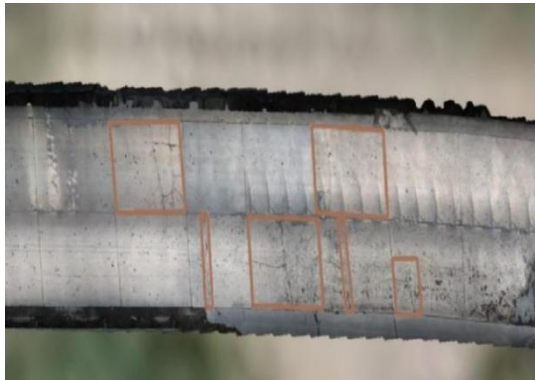


图 3 路面可视化及病害智能识别



图 4 水泥路面智能声波脱空检测仪



图 5 路用 FWA 智能检测车

2、数字化加固

依托公路维护数字化可视系统及专项检测提供的地聚合物注浆处治精准区域，采用遥控智能钻孔设备、遥控智能注浆设备和超高流动性的地聚合物注浆材料，对结构层缺陷区域进行针对性的渗透、填充、胶结、挤压密实，提高公路承载能力，使其强度均质化。



图 6 地聚合物注浆施工现场

桥涵、地下管线及房屋等受限路段，在小于安全距离范围内时，采用小型智能微裂设备，进行微裂处治。

4、沥青混凝土加铺

按照沥青混凝土路面施工要求，依次撒布封层、铺设面层。

三、工程应用情况

2023 年，在浙江省宁波市宁海县公路养护工程中采用了水泥路面微裂均质化再生处治技术，旧路改造方案为：微裂均质化再生处治+拉毛+4cm 沥青混凝土下面层+3cm 沥青混凝土上面层，加铺沥青面层满足了路面平整度、降低路面噪音等功能性需求。



图 11 施工现场

四、成本造价

该技术与共振碎石化工艺相比，可达到同等寿命，造价节省 30%；与直接加铺工艺相比，虽然单次养护造价高约 50%，但寿命可达到两倍以上，全寿命周期成本节省 25%以上。

五、应用效果

项目改造后，实现了平整度、降噪和路域环境的全面提升。项目通车运营两年后，通过专项检测及项目回访，尚未发现反射裂缝等任何病害，整体路况良好。



图 12 改造 2 年后实际图（2025 年拍摄）

旅游公路彩色陶瓷颗粒微表处技术应用

山东省滕州市交通运输局

一、应用场景

随着交通量不断增加和使用年限逐步增长，农村公路沥青路面出现裂缝、车辙、坑槽等病害，需要及时养护。传统养护技术普遍存在资源浪费、环境污染等问题，制约“四好农村路”高质量发展。近年来，山东省滕州市交通运输局围绕“交通+旅游”融合发展，落实枣庄市“交通强国”深化农村公路管理养护体制改革试点市创建，研究探索绿色公路新模式，将绿色低碳理念贯穿“四好农村路”养护全过程，实现农村公路绿色低碳技术成功探索，并取得了明显成效。彩色陶瓷颗粒微表处具有较好的耐磨性、保色性和耐腐蚀性，广泛适用“四好农村路”改造和旅游公路建设，较好地破解了农村公路养护技术难题。

二、施工工况及工艺流程

（一）材料特性

采用新型改性聚氨酯彩色防滑涂料，具有优异的柔韧性、强度、色彩保持性及耐候性等的特殊优势。陶瓷颗粒产品具有防滑性能优异，高耐磨高防滑，颜色鲜艳多样，不褪色，耐腐蚀，耐高温低温，硬度高，施工方便。改性聚氨酯防滑涂料技术指标见表1，陶瓷颗粒技术指标见表2。

表1 改性聚氨酯防滑涂料技术指标

技术指标		JT712	T/CCTAS 25—2021	测试数据
断裂延伸率，%	含填料	无	5℃≥15	30
	不含填料（本体树脂）		23℃≥45	90
拉伸强度，MPa （标准条件）	含填料	无	≥8	10
	不含填料（本体树脂）		≥11	13
拉拔强度（23℃，钢板），MPa		无	≥6	11

表 2 陶瓷颗粒技术指标

技术指标	JT712	T/CCTAS 25—2021	测试数据
粒径，mm	≤5	≤5	符合要求
莫氏硬度	≥6	≥6	7
坚固性（>0.3mm部分），%	无	≤40	30
耐热性（1000℃，0.5h）	无	骨料颜色不变或轻微变化	颜色不变

（二）施工流程以及技术要点

工艺流程：施工准备、清扫路面、固定区域、底胶调制、底胶施工（或同步封层车施工）、骨料撒布、清理浮粒、整体修整、开放交通。技术要点如下：

1、粘贴胶纸、固定区域：根据施工要求弹线，按照弹线标准粘贴胶纸，弹线距离路沿 5cm，胶纸粘贴整齐、顺直，不脱落。分隔施工段，设置边界挡板，接缝处粘接胶粘带，保证不漏料。

2、底胶调制与施工：打开包装桶，A 组分充分搅拌。将 B 组分全部倒入 A 组分中，电动搅拌 3-5 分钟，使两组分颜色保持均匀一致。将调制好的胶结料均匀摊铺到作业位置，使用专用刮杆刮平整，保证底胶厚度均匀，充满整个作业面，无漏点。建议施工用量：3-5kg/m²。底胶调制施工现场见图 1：



图 1 底胶调制施工现场

3、骨料撒布:底胶刮涂均匀后,人工同步均匀抛洒陶瓷颗粒,建议用量: 4-5kg/m²。也可机械抛洒施工,骨料撒布如图 2 所示:



图 2 骨料撒布现场

4、清理浮粒:底胶固化有强度后,即可人工清理浮粒,将粘结不牢的骨粒完全清理回收至相应位置。也可采用骨料回收器机械化清理,达到路面无洒落骨料效果。

5、整体修整:对线型不好位置进行微调,对多涂或漏涂部位进行修补和完善,除去溢出和不规则的涂膜,将作业区域清理干净。

6、开放交通:施工完成后,需常温养护,不得洒水。养护完成后撤除防护措施开放交通。

(三) 施工总体流程图

施工主要流程包括:基材处理、底胶施工+骨料撒布、骨料回收、涂层施工和养护。主要流程如图 3 所示:



图 3 施工主要流程图

三、工程应用情况

彩色陶瓷颗粒微表处技术应用旅游公路,成功探索出了农村公路养护工程新路径。莲微绿道主线长 57.8km,其中 0.8km 莲青山景区连接公路、2.4km 东郭镇连心路、4km 界河北堤路维修时,引入改性聚氨酯+彩色陶瓷颗粒探索应用农村公路养护工程,微表处技术不仅解决了老路面裂缝、脱落,河堤路受河道水位影响出现裂缝变形等问题,也通过颜色的变化更好的将公路融入周围自然景观,实现了交通旅游融合发展。改造后实景展示见图 4:



图 4 改造后实景效果展示

四、成本造价

采用传统的铣刨复铺+裂缝处治施工方式,平均造价 150 元/m²,砂石用量较大。传统的沥青改色彩色路面铺装方案,由于涂料容易磨损、老化及褪色,使用寿命短,需要定期重新喷涂维护,养护成本相对较高。滕州市依托山东省“鲁风运河”旅游廊道,精心打造 57.8km 旅游公路,探索使用耐久性强、保色性优异、经济性强的新型环保高分子彩色路面微表处技术。改性聚氨酯+彩色陶瓷颗粒铺装农村公路,材料综合价格约 1.5 万元/T,工程造价(材料+施工)约 110 元/m²,相比传统的老路面铣刨复铺+裂缝处治,施工成本降低 27%,节约了大量养护资金。这种新型环保高分子彩色路面使用寿命可保持 6 年以上,相比现有传统的彩色铺装产品使用寿命延长 2-3 倍,减少重复施工影响,降低了全寿命周期养护成本,兼具经济性、安全性与环保性,具有很好的推广应用价值。

五、应用效果

莲微绿道项目改造前，穿村路段缺乏路域特色，沿线绿化品种单调，路面病害较多，公路排水不畅。采用彩色陶瓷颗粒微表处技术实施改造后，有效解决了路面网裂、返砂露骨及河堤路段受水位影响出现裂缝等典型病害问题，通过颜色变化将公路融入自然景观，路景融合，契合“双碳”目标，成为旅游公路的优选方案。公路两侧全线喷涂厚度 0.5cm 绿色薄层，并在山、水景色优美路段全幅铺筑彩色陶瓷颗粒，实现路景融为一体，与沿线自然风光相映成趣，为莲青山风景区和微山湖红荷湿地增添了一道美丽风景线。2025 年 5 月，被中国公路学会推荐入选“2025 年全国美丽公路项目”。经过通车运营和现场检测，彩色路面色彩鲜明、路用性能平整舒适，路面病害处治妥当，防水性能良好，已成为网红打卡新地标，带动了旅游产业快速发展，开创了交旅融合新局面，打造成为“四好农村路”示范工程，推广应用效果十分显著。

水泥路面微裂均质化现场再生技术应用

河南省新县交通运输局

一、适用场景

水泥路面微裂均质化现场再生技术用于公路养护，处理水泥路面内部问题，适用于旧路加铺沥青。此技术可减少沥青层开裂和厚度，无需大规模开挖旧路面，交通干扰小，能快速恢复交通。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工工况

新技术首先利用路面养护平台，结合影像识别和检测，确定路面脱空和松散位置；然后使用地聚合物注浆材料和智能设备进行加固，使旧水泥路面承载能力均质化；最后通过智能微裂设备实现水泥面板微裂，达到板块裂而不碎的效果。

（二）施工工艺流程

1、利用可视化养护平台进行路面病害分析

通过路面养护平台，完成水泥路面的调查、病害分析、检测、养护设计、施工和运维管理。平台辅助进行精确的路面病害分析，支持养护方案的数据需求。



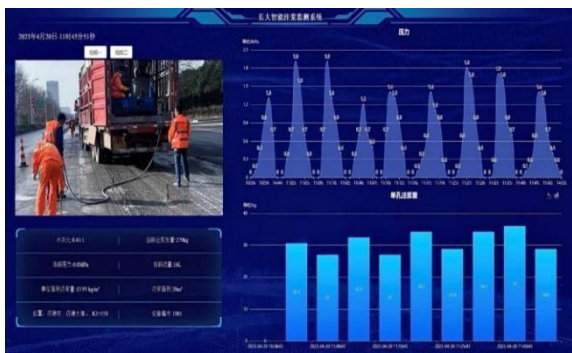


图 3 均质化处治（左：智能注浆；右：注浆后效果）

4、微裂再生施工

微裂再生施工视不同路段的公路技术状况，采取“差异化”施工工艺参数，确保每一板块都微裂稳定。



图 4 微裂再生施工（左：施工过程；右：施工后效果）

微裂再生后效果：表面裂而不碎、内部斜向开裂、完全契合。



图 5 路面缺陷修复效果

5、路面缺陷修复

针对旧水泥路面裂缝较宽、崩边较宽或坑槽较大的路表缺陷，采用快凝混凝土或地聚合物注浆进行缺陷修复处置。

6、层间处理



图 6 层间处理（左：铣刨、拉毛；右：橡胶沥青碎石封层工后效果）

对微裂均质化处治后的水泥混凝土路面进行铣刨拉毛处理，深度控制为 5mm~10mm。拉毛完成后应对板块表面的粉尘、碎屑进行冲洗，确保板块表面干燥无尘，再撒布橡胶沥青（或改性沥青）同步碎石封层，加强层间封水及粘结作用。

7、面层加铺



图 7 面层摊铺

三、工程应用情况

新县酒店至分水岭至湖北省界段改建工程全程采用微裂均质化技术进行旧水泥路面再生改造，应用长度约 8.03 公里，应用面积约 52240m²。新县县城至周河至熊河段改造提升工程全程采用微裂均质化技术进行旧水泥路面再生改造，应用长度约 28.21 公里，应用面积约 193307m²。这些项目在采用该技术后未出现结构性反射裂缝，使用状况良好。

四、成本造价

在工程实践来看，该技术对原有旧水泥混凝土路面处置后就地再生利用为施工面层材料，避免“开膛破肚”式挖除重建，100%循环利用，无需新购混凝土，有效降低了工程投资，具有建设周期短、绿色环保、节约投资等优点。工程综合成本分析：采用水泥混凝土路面微裂均质化现场再生处治新技术综合造价相较于传统“挖除重建”综合造价降低约 30%。

五、应用效果

（一）与其它常见处置方案应用效果对比

表 1 不同处治技术方案对比

项目	微裂均质化再生处治	碎石化	直接加铺
旧路强度损失	水泥板块形成微细裂纹，表面裂而不碎，内部斜向开裂，互相嵌锁，强度损失小。	表面破碎程度高，形成5-6cm厚碎石层，强度损失较大。	不对水泥板破碎，维持原有强度。
旧路承载能力	稳定板块，加固基层和路基，承载能力较高，且均匀。	水泥板强度损失大，承载能力较低。	水泥板强度较高，承载能力较高。
反射裂缝	层间脱空消除，缝间传荷改善，板块稳定，应力释放，程“刚柔相济”状态，无反射裂缝。	板块应力完全释放，呈柔性状态，无反射裂缝，但容易出现车辙、推移和疲劳开裂破坏。	旧水泥板未处治，温缩应力等产生的应变未能消除，易产生反射裂缝。
经济效益	旧路就地再利用，处治彻底，可直接加铺面层，工期短，使用寿命长，养护成本低。	碎石化后，水泥板强度损失大，需加铺补强层或加厚沥青面层，成本较高。	工期短，但旧路处治不彻底，使用寿命短，后期养护成本高。
环境效益	不大填大挖、不浪费、施工速度较快。噪声较小，绿色环保无污染。	破碎程度高、工期长、振动频率高、噪声大。	施工便捷、不浪费、无污染、噪声小。
社会效益	注浆后养生4-6h可开放交通；微裂完，即可通车，交通干扰小。	工后要及时撒布乳化沥青，需等待其破乳固化；12-24h内禁止车辆通行，交通干扰大。	施工组织简便，但加铺防裂贴后不宜通车，需及时加铺面层，交通干扰小。

(二) 与传统技术对比质量上的优势

1、抗裂效果好。采用“以裂攻裂”新理念，彻底克服剪切、疲劳、温缩三类反射裂缝源；既有效克服反射裂缝，又最大限度保留公路承载能力，实现两者最佳平衡，提高公路使用寿命。

2、承载能力强。旧水泥面板微裂后表面无松散破碎颗粒，且具有“表面裂而不碎、内部斜向开裂、完全契合、嵌锁力强”的结构特点，强度损失小。

3、使用寿命长。微裂压稳后的旧水泥混凝土面板，属于一种“刚柔相济”的受力状态，耐久性较好，无疲劳损失，公路使用寿命长。

农村公路 AI 智能巡查及科学决策技术应用

湖南省交通运输厅农村公路处

一、使用场景

农村公路是连接城乡的“毛细血管”，更是激活乡村经济的“黄金通道”。但由于农村公路分布广、线路长且部分路段地形复杂，传统人工巡查方式难以全面、及时、准确地掌握道路状况。加上资金不足、资金使用效率不高、项目监管缺乏有效手段等问题，一直制约着农村公路高质量发展。

为破解难题，近年来我省深入贯彻习近平总书记关于“四好农村路”指示精神，围绕“交通强国”试点任务，通过创新应用科学决策与 AI 智能巡查技术，实现了农村公路“低成本、高频次”的智能巡查，并做到了“精准决策、资金高效、远程监管”。

二、工作流程

（一）创 AI 智慧巡查，开辟“低成本高频次”主动防治新路径

一是载体智能化赋能。在客货邮公交车上部署 AI 智能设备，将客货邮车辆变身为“养护巡查机器人”，在不影响其正常营运的前提下同步完成道路巡查。边端部署病害自动识别算法，可对一般、修复和应急等三大类病害精准快速自动识别，识别准确率达 90%以上。

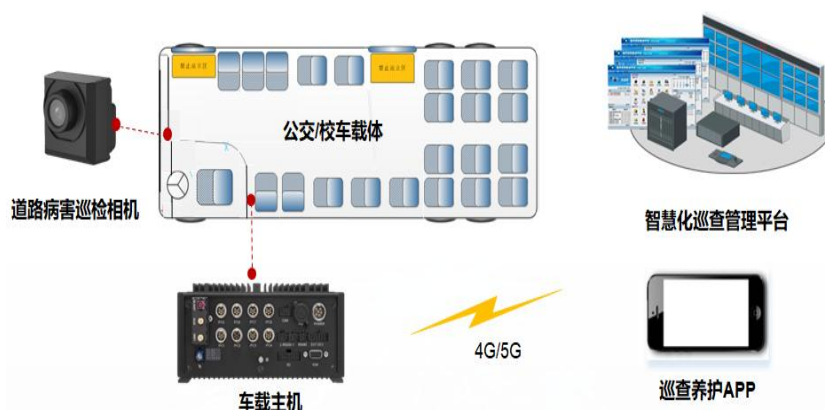


图 1 客货邮车辆部署 AI 智能巡查技术框架

二是处治联动化分级响应。巡查过程中识别的病害清单自动上传，系统针对病害类型分级生成处治方案。对于路面裂缝坑槽、接缝料损坏等一

般病害，系统按月向管养单位派发预防养护任务清单，及时完成；对路面板破碎、路面沉陷等修复养护病害，系统提醒县区交通主管部门制定专项修复方案，按时完成处治；对边坡坍塌、护栏缺损等应急病害，立即推送管养单位限时完成抢修。

三是监管穿透化闭环。通过 AI 巡查建立“病害时光机”，可对现场病害的发生、发展、修复的全过程影像进行动态掌控，使省市交通主管部门对项目进度、计划执行情况实现远程化、智能化监管。



图 2 “病害时光机”核查实施完成情况

（二）挖数据潜能，探索“模型驱动+量化闭环”决策新机制

一是数据建模智能化。基于“一路一档”数据底座，融合路面结构、路况数据、通车年限、养护历史等多种核心因素，通过机器学习算法构建路面性能衰变预测模型，深度解析我省近 5 年的 11216 个养护案例，提炼我省农村公路的常见病害和处治方案，建立了符合我省农村公路养护实际的科学决策算法体系。

二是沙盘推演可视化。基于建立的决策模型研发可交互式的智能养护决策沙盘。以县区农村公路网为单元，以既有路况水平为参数，输入预期目标指数，一键生成三维动态方案，明确最优处治方案，形成优先级项目清单及资金需求测算表。

三是决策效能闭环化。打通“数据-沙盘-财政”全链通路，区县交通主管部门根据绩效目标直输参数形成全寿命周期养护效益费用比最大化

沙盘方案，并以此作为预算申请依据，财政部门依据动态量化指标库（效益费用比/预期 PCI 提升率）下达财政预算资金，并在养护工程实施完成后自动评估绩效，实现“策略制定→精准投入→效果验证”增效闭环。



图 3 湖南省农村公路科学决策沙盘系统

三、应用情况

自 AI 智能巡查与养护科学决策系统投入应用以来，以吉首市为例，在日常巡查工作中，全市 58 条客货邮营运路线均部署了 AI 智能巡查装备，实现了全市年报 700 余公里农村公路的智能巡检全覆盖。巡查频次从每月 1 次跃升至每日至少 1 次。根据智能巡查病害数据库来看，全市 121 公里沥青路面累计发现病害 3520 处，621 公里水泥路面累计发现病害 54180 处。

结合巡查病害和路况数据，吉首以全市农村公路中等及以上路率提升至 96%为目标，沙盘决策系统给出了全寿命周期处治效益最优方案，建议投入资金 1724 万元，其中预防性养护 541 万元，修复性养护 1183 万元。根据系统提供的具体养护方案，可有效的提升路况指标，全市的 PQI 中等及以上路率可从 91.72%提升到 96.68%，PQI 优良路率可从 53.98%提升到 61.34%。

四、成本造价

AI 智能巡查由便携式快速采集前端、AI 智能识别算法及智能巡查管理平台三部分组成。采集前端安装便捷，无需对原有采集车辆进行改装，

单套设备前端、算法及平台的总成本可控制在 8 万元以内，同时还可与客货邮车辆原有监控摄像设施结合，成本将会进一步降低。通过部署 AI 智能巡查，可将日常巡查频次从每月 1 次跃升至每日至少 1 次，通过自动识别发现病害，无需专业技术人员，巡查成本较传统人工巡查降低了约 80%。

五、应用效果

（一）资金分配从“经验判断”转向“数据说话”

通过养护决策沙盘系统，以既有路况水平和预期目标为参数，自动生成最优处治方案。将决策预算从以往的经验判断转变为数据驱动，使养护资金投入更加精准，让有限的养护资源得到优化配置。为基层在申请年度预算时提供了科学依据，不仅让财政预算更具预见性，更让养护资金的使用效益实现了质的提升。

（二）养护管理从“被动抢修”变为“主动预防”

通过 AI 智能低成本、高频次的开展巡查工作，做到了及时、客观、准确的发现病害隐患，通过留痕化、可溯源化的派单处治信息化流程，确保问题得到及时处治，在病害进一步发展扩大前主动养护，避免了可以提前花小钱的地方却花了大钱的情况发生。同时强化了对边坡滑坡等危害道路安全的应急病害的监控，有效减少道路安全隐患，为农村居民出行及乡村经济发展提供了更加安全、畅通的交通环境。

（三）项目建设从“模糊监管”升级为“精准把控”

通过 AI 智能巡查的“病害时光机”，可一键回溯项目的执行全过程，从病害发现、方案制定、启动施工、完工确认的每一步系统均可自动验证，突破传统项目建设“模糊监管”局限，管理人员无需到现场就能通过平台远程核查进度，实现对项目实施情况的远程精准监管，有效保障项目按计划不折不扣落地执行。

水泥混凝土路面全深式破碎冷再生技术

湖南省长沙市望城区公路养护中心

一、适用场景

水泥混凝土路面全深式破碎冷再生技术是一种环保、节能、高效的公路维修方法。该技术通过冷再生机对旧路面结构层进行破碎、铣刨，然后添加再生材料（如水泥、乳化沥青等）进行搅拌、摊铺和碾压，最终形成新的路面结构层。主要适用于以下场景：

- 1、各类低等级水泥混凝土路面改造，对破损路面进行再生利用，可以降低农村公路的改造成本，并实现资源循环利用。
- 2、路基、路面病害面积较大，或需对基层进行翻挖修复的，能通过冷再生工艺提升基层性能，保障公路结构稳定性。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工前期准备

1、机械要求

主要机械设备包括路面冷再生机、压路机（振动压路机、胶轮压路机）、水泥洒布车、装载机、平地机、洒水车等。

2、材料要求

主要材料水泥选用强度等级合适、质量稳定的普通硅酸盐水泥。

3、现场要求

- （1）清理施工现场，拆除影响施工的障碍物，待施工完成后恢复。
- （2）对原混凝土路面进行清扫，清除表面的杂物、尘土、油污等，确保路面干净整洁。
- （3）根据设计要求和施工需要，在施工现场设置测量控制桩，进行高程、中线和边线的测量放样，每 10-20m 设一桩，并在桩上标明冷再生层的设计高程。

（二）冷再生施工流程

施工准备→旧路面破碎与铣刨→材料配比与搅拌→摊铺与整形→碾压与养生→验收与铺面。



图 1 预破



图 2 二破



图 3 水泥洒布



图 4 拌合及平整



图 5 碾压



图 6 弯沉试验

(三) 施工中质量把控

1、原材料质量控制

(1) 严格控制水泥的质量，每批材料进场时必须有质量证明文件，并按规定频率进行抽样检验。对原混凝土路面破碎后的旧料级配进行检测，确保其破碎后的粒径符合设计要求，最大粒径一般不超过 40mm，且级配良好。

2、施工过程质量把控

(1) 冷再生施工过程中，应严格控制破碎深度、拌和均匀性、含水量、压实度等关键指标。通过含水量快速测定仪实时监测含水量，及时调整加水。

(2) 加强对路面平整度、高程、宽度、横坡等外观质量的控制。

(3) 冷再生施工应尽量避免纵向接缝，当无法避免时，应采用搭接的方式进行处理。

三、工程应用情况

近年来，我区采用水泥混凝土路面全深式破碎冷再生技术进行农村公路养护工程实施，取得良好效果。2024 年对 X196（K6+670-K9+860）大修工程中运用了此技术，施工路面厚 24 厘米，长度 3190 米，宽 5.5 米，原路面为水泥混凝土结构，因使用年限较长，出现了大面积裂缝、坑槽和车辙等病害，通过冷再生技术的实施，X196 公路大修项目取得了显著成效：路面质量显著提高，冷再生路面的平整度、压实度和强度均满足设计要求，经验收各项指标均符合质量要求，甚至优于传统施工方法。今年对 X005(K0+000-K5+415) 大修工程中再次运用了此技术。



图 7 X196 公路现状

四、成本造价

水泥混凝土路面全深式破碎冷再生技术实现了旧路面材料的 100% 利用，减少了新料购置运输、旧料运输和处理等环节的费用，以 X196 为例，

新技术相对于传统大修施工工艺,共节约施工成本 36%,工期缩短 2 个月。

五、应用效果

1、节约资源：能直接利用旧路面材料，减少新石料的用量，降低对自然资源的开采。

2、降低成本：省去旧料运输和处理费用，同时减少新材料采购成本，整体施工成本可降低 35%左右。

3、施工效率高：无需对旧路面进行大量破碎和清运，施工流程简化，可快速完成基层再生，缩短工期 30%。

4、环保性好：减少建筑垃圾产生和运输过程中的粉尘、噪音污染，符合绿色施工理念。

5、适应性强：可根据旧路面状况调整再生工艺，适用于不同破损程度的混凝土路面基层修复。

反应型冷补料与贴缝带联合工艺沥青路面坑槽修复技术

广西壮族自治区金秀瑶族自治县交通运输局

一、适用场景

反应型冷补料与贴缝带联合工艺专为潮湿积水、坑槽伴裂缝等复合病害的快速抢修场景设计：通过冷补料遇水加速固化（形成刚性填充）与贴缝带即时柔性密封的刚柔协同作用，高效治理雨雪积水路段、交通繁忙区路面坑槽、开裂等病害，实现“即修即通”。

二、工艺流程

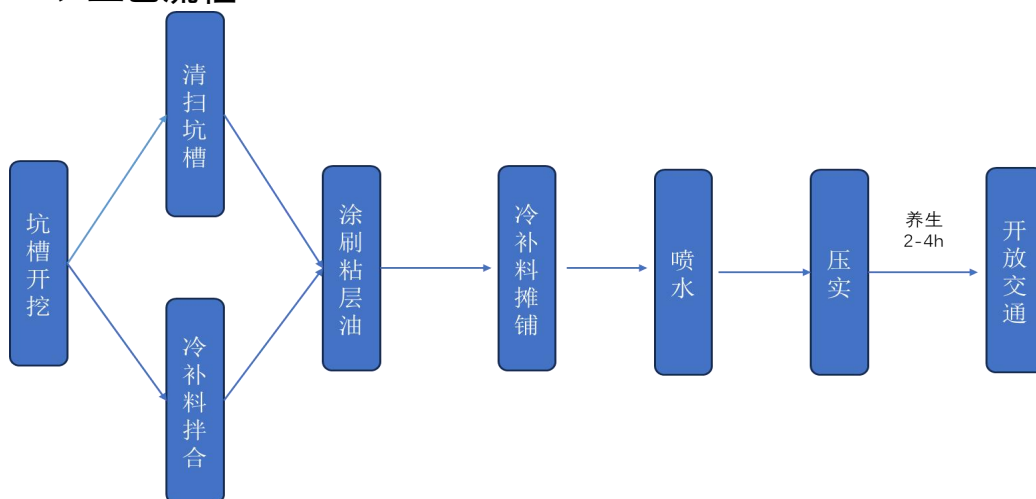


图1 工艺流程图

（一）坑槽开挖

确定路面破损部分的边界和深度，按照“圆洞方补”原则，将破损处开槽成型。

（二）清扫坑槽

将坑槽内及四周的碎石、废渣清理干净，坑槽内不得存有泥浆、积水和冰块等杂物。扫除槽内槽壁碎石、尘土、积水等杂物。

（三）涂刷粘层油

应在坑槽摊铺沥青混合料之前，先向坑槽壁面和底面均匀地喷洒一层粘层油，浸润坑槽内表面裸露出的石料，提高修补料与原有路面材料间的粘结效果。

（四）冷补料现场拌合及摊铺

将沥青混合料倒入坑槽中，直到填料高出路面 1-2cm 左右，填满后坑槽中央应稍高于路面呈凸状。对于破损深度在 5cm 以上坑槽，可采用 3-5cm 为一层，分层填补、逐层压实。

（五）压实

铺设均匀并喷水后，根据修补面积大小和深度，选择适当压实工具和方法进行压实。如：小型振动夯实机、小型压路机等。建议坑槽面积超过 1 平方米采用小型钢轮压路机或型号相当的机械进行压实。

（六）开放交通

坑槽修补完毕，应清理作业区域，待冷补料固化成型后即可开放交通。



①坑槽开挖



②清扫坑槽



③涂刷粘层油



④冷补料摊铺



⑤压实



⑥开放交通

图 2 实施工艺流程

三、工程应用情况

(一) 2024 年秋季，针对 X669 县道中平至瓦厂段（桩号 K9+785 ~ K21+100）沥青面层老化严重路段，成功应用反应型冷补料与贴缝带联合修复工艺。

坑槽病害：分布 32 处小型坑槽，平均深度 4-6cm。

裂缝病害：纵向裂缝 18 条，缝宽 5-8mm。

(二) 关键工艺适配与应用成效

反应型冷补料与贴缝带的联合优势适用该场景：

1、高效协同处置复合病害

坑槽：反应型冷补料快速填充 4-6cm 深坑槽，满足分层压实工艺要求。

裂缝：贴缝带精准密封 5-8mm 宽纵缝，有效弥补传统灌缝对宽缝的不足。

2、保障潮湿环境修复可靠性

冷补料利用地表湿气加速固化，增强潮湿条件下粘结强度。贴缝带提供柔性防水密封，阻隔雨水下渗。

3、最大限度降低干扰

快速开放交通：单点修复（坑槽压实+裂缝粘贴）2 小时内完成，即时开放交通（限速通行重车）。

高效施工组织：班组日修复量可覆盖路段>50%病害点，大幅缩短总工期。

四、成本造价分析

综合单价：20-35 元/m²。相较于铣刨重新加铺面层的方案，成本节省了约 20%成本。

五、应用效果

(一) 技术性能对比

表 1 技术性能对比表

项目名称	热拌沥青混合料	反应型沥青冷补料	乳化型沥青冷补料	溶剂型沥青冷补料
马歇尔稳定度	8-12kN	> 20kN	6-10kN	8.62kN
水稳性能	残留稳定度为 ≥85%	> 94%	80%左右	91.6%
储运条件	拌合站远离市区， 需保温运料车	袋装产品运至 现场，拌和加入 固化组分	不可预制为成品， 需现拌现用	可预制为成品， 按需取用
机械设备	需要拌合站生产混合料， 储料保温车辆等大型设备	人工、简易设备	人工、简易设备	人工、简易设备
燃料消耗	沥青石料均需加热	不需加热	不需加热	不需加热
环境成本	产生浓烟、粉尘、 CO ₂ 等，环境污染大。 用于干燥环境。	高分子材料，水性材料保。 可用于潮湿阴雨天气。	一般需在酸性条件下制备， 有一定污染。适用于干燥环境。	基本无污染。适用于干燥环境。

（二）现场应用跟踪

1、短期性能（修复后 2 个月内）：坑槽处压实密实，无车辙或二次剥落；贴缝带密封性良好，渗水率下降 90%（洒水测试）。

2、耐久性验证（半年跟踪）：坑槽完好率 92%，7%微变形（边缘压实不足），1%因重载超限破损；裂缝处贴缝带破损率 5%，优于传统灌缝的 15%开裂率。

3、社会效益：雨季应急修复响应时间 < 4 小时，路段通行中断时间压缩至原 1/3，居民投诉率较同期下降 67%，提升群众满意度。

4、成本效益：免去大型设备租赁与燃料成本，快速通车减少交通管制间接成本，高耐久性显著降低返修频次（全周期维护成本下降 > 30%）。

固化土路面技术

四川省成都市双流区交通运输局

一、适用场景

固化土路面是一种利用土固化剂或稳定剂对天然土壤进行物理和化学改性处理，提高其工程性能，如强度、水稳性、耐久性等，使之满足公路结构层要求的工程技术，厚度一般为 22cm。适用于农村公路、乡镇公路、场区内部公路、公园、景区内的生态步道、自行车道、自然保护区等要求与自然和谐的地方得到广泛应用及普及。

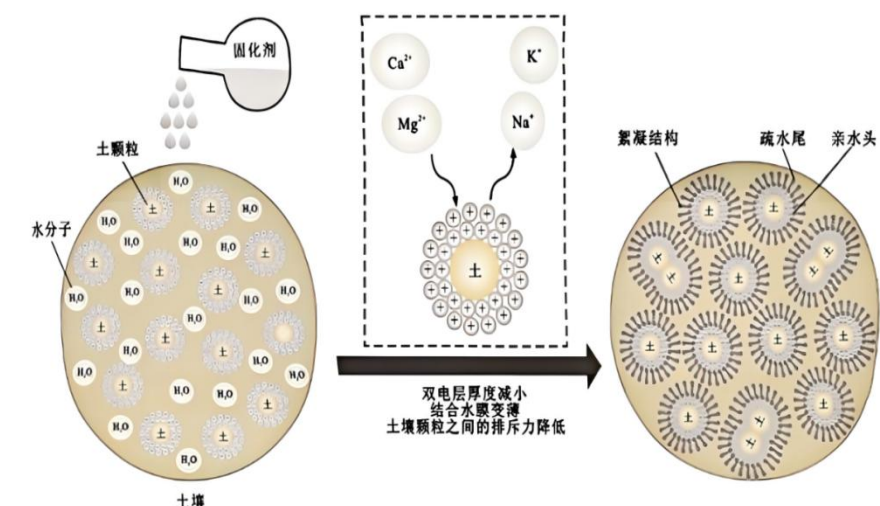


图 1 原理示意图



图 2 典型外观

二、施工工况及工艺流程

（一）材料要求

1、土壤：根据实验配合比选取符合要求的黏性土，塑性指数 8-20，筛除杂物及大颗粒物（粒径 $\leq 5\text{cm}$ ）。

2、砂：选用天然砂，砂粒径为 0.075~4.75mm（中粗砂）。

3、碎石：选用片状碎石，碎石粒径 5~20mm 为宜。

4、水泥：选用 PO 42.5 水泥。

5、固化剂：选用水泥基、石灰基、化学类固化剂，压实型采用 SV-LLT 固化剂、封层型采用 SV-LFT 固化剂，掺量根据试验确定（参考范围：3%-8%）。

表 1 SV-LLT 压实固化剂材料性能指标

指标	单位	要求	测试方法
密度，25℃	MPa.s	0.9-1.1	CJJ/T286-2018土壤固化剂应用技术标准
固含量	%	≥ 22	CJJ/T286-2018土壤固化剂应用技术标准
PH（1%，25℃）	mol/L	5-8	CJJ/T286-2018土壤固化剂应用技术标准

表 2 SV-LFT 封层固化剂材料性能指标

指标	单位	要求	测试方法
密度，25℃	MPa.s	0.9-1.1	CJJ/T286-2018土壤固化剂应用技术标准
固含量	%	≥ 22	CJJ/T286-2018土壤固化剂应用技术标准
PH（1%，25℃）	mol/L	6-9	CJJ/T286-2018土壤固化剂应用技术标准

6、水：清洁无污染，pH 值中性。

（二）工艺流程

固化土路面采用路拌法摊铺方式进行：路基整平-碎石摊铺-砂摊铺-素土摊铺-素土碾压-水泥撒布-冷再生拌匀（加入固化剂）-路面精平-路面压实-路面养护-喷洒封层固化剂-开放交通，如下所示：



图 3 实施工艺流程

三、工程应用情况

2025 年 3 月，在成都市双流区 2024 年农村公路提升改造工程项目九倒拐 2 公路中采用土壤固化剂对原土进行改良，形成高强度固化土路面结构层。



图 4 施工现场

四、成本造价

通过对比固化土路面与常规“混凝土路面、沥青混凝土路面”材料，综合效益显著。

表 3 固化土路面技术与传统技术对比

具体指标	固化土路面	混凝土路面	沥青混凝土路面
主要材料	本地土壤+固化剂(水泥/石灰等)	水泥、骨料、钢筋	沥青、骨料、矿粉
结构类型	半刚性基层	刚性面板	柔性结构
典型厚度	15-30cm（基层）	20-30cm（面板）	5-15cm（面层）
抗压强度	1.5-4.0MPa	20-40MPa	15℃-25℃=2-8MPa 25℃-60℃≤MPa
抗弯拉强度	低（≤0.5MPa）	高（4-6MPa）	中（1-3MPa）
核心设备	路拌机、压路机	搅拌站、摊铺机、振捣设备	沥青站、摊铺机、压路机
施工速度	中（1-2km/天）	慢（0.5-1km/天）	快（2-4km/天）
养护要求	保湿养护7天	洒水养护14-28天	冷却通车（2-6小时）
温度敏感性	低（C~40°）	高（>5℃施工）	高（>10℃施工）
设计寿命	8-15年	20-40年	10-15年
抗裂性	偏中（干缩裂缝）	中（可控收缩缝）	优（无接缝）
水稳定性	中（依赖固化剂）	优（不透水）	中（怕水损害）
抗冻融性	中	高	中
行车舒适性	中	低（刚性颠簸）	高（弹性震）
噪音水平	65-70dB	75-60dB	60-65dB
材料成本	★☆☆☆☆（极低）	★★★★☆☆（高）	★★★★★☆☆（较高）
施工成本	★★☆☆☆☆（低）	★★★★★☆☆（高）	★★★★☆☆☆（中高）
碳排放里	★☆☆☆☆（最低）	★★★★★☆☆（水泥高碳）	★★★★☆☆☆（沥青能耗高）
维修便捷性	★★★★☆☆（局部修补）	★*☆☆☆☆（整板更换）	★★★★★☆☆（铣刨重铺）
最佳用途	农村路、临时便道、生态步道	高速路、机场、港口	城市公路、高等级公路
推荐交通等级	轻载（<100辆/天）	重载（>1000辆/天）	中高载（200-5000辆/天）
地质适应性	优（就地取材）	差（需稳定地基）	中（需坚实基层）

综上对比结论：固化土技术创造显著经济效益，主要体现在三大维度：材料成本节约、运输费用降低和工期缩短。基于“就地取材”原则，固化土可 100%利用现场土方或建筑渣土，免除外购材料运输。以 12 米宽路基为例，每公里节约投资 > 30%。

工期缩短带来间接经济效益更为可观。传统水泥稳定碎石基层需经历 7 天养护期方能进行下一工序，而早强型固化土路面仅需 48 小时即可开放轻量交通、7 天全面开放交通，缩短工期 50%。

全寿命周期成本分析更具说服力。因固化土基层抗渗性提升 40%，有效预防水损害导致的早期破坏，减少养护频次。数据显示，固化土路面在运营 10 年内的维修费用比传统结构降低 35%。

五、应用效果

项目改造后，排除了原始土路存在遇雨泥泞裹足、遇晴尘土飞扬，坑洼难行的致命缺点，有效解决了村民出行难等问题。

固化土以使用天然土为原材料的铺装方式，其特有的优点也是沥青与混凝土公路所无法比拟的，其保水持久性高，和混凝土、沥青铺装相比更高一筹，固化土铺面系统可变废为宝，节约能源资源，节省人力财力，减少环境污染和对气候的影响，是未来可持续经济发展、可循环再利用的。

通过这些技术的应用，实现了农村公路建设的节能降碳、提质增效，满足了公路行业绿色、可持续发展的要求。



(a) 雨天效果图



(b) 晴天效果图

图 5 追踪调查结果

结合该路段 2025 年 3 月通车后调查结果显示，该路面未出现车辙及坑洼，路面保持较高板体性和均匀承载力，防水效果良好，满足轻型交通需求。

全过程数字化水泥路面微裂均质化薄层加铺技术

陕西省留坝县交通运输局

一、适用场景

全过程数字化水泥路面微裂均质化薄层加铺技术，采用路面可视化养护平台，结合水泥路面智能声波检测仪、路用 FWA 智能检测车、雷达等专项检测设备，实现“路表可视化影像、识别路面病害、确定结构内存在缺陷位置”自动化。同时依托数字化平台监控系统对结构内缺陷采用数字化注浆加固，对旧水泥路面进行微裂均质化处理过程中利用数字化平台微裂数据实时指导现场精细施工。该技术采用数字化+微裂均质化实现薄层加铺的高效方案，精准消除反射裂缝并显著提升老路结构强度，实现旧路薄层直接加铺与长寿命养护。

适用于各等级水泥混凝土路面的“白改黑”改造工程，具有“低成本、零废弃、快通车、长寿命”等特点，可为旅游公路等生态敏感场景提供养护技术范本。



图 1 全过程数字化水泥路面微裂均质化薄层加铺技术核心理论

二、施工工艺流程

（一）施工工况

- 1、施工工况：宽度大于 3 米的水泥路面，需半封闭交通，温度高于 5℃。
- 2、材料要求：地聚合物注浆材料性能满足技术要求。

3、主要设备要求:

名称	项目	技术要求
微裂设备	最大冲击能量	≥66 kJ
	档位	无级变速
	预裂导向块	微裂化
	控制方式	自动化/无线遥控

(二) 工艺流程

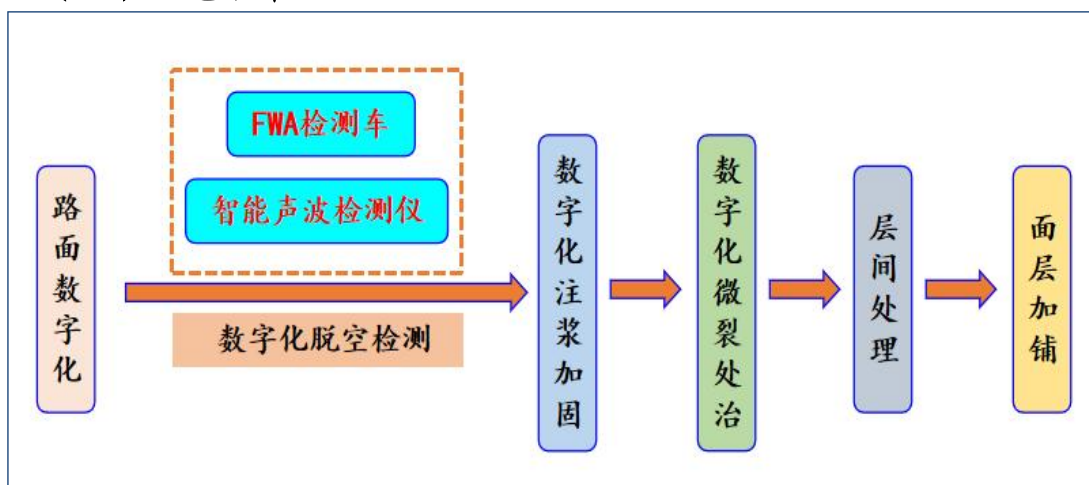


图 2 工艺流程

三、工程应用情况

汉中市留坝县南楼路，全长 4.2 公里，路面宽 4.5m，水泥混凝土路面。2025 年 3 月该路段采用全过程数字化微裂均质化再生处治技术对病害实施大中修养护。

(一) 病害特征。横纵向裂缝 12%、板角断裂 3%、局部破碎板 2%。

(二) 处治方案。全过程数字化微裂均质化再生处治+铣刨拉毛+1cm 同步碎石封层+4cmAC-13 沥青混凝土面层。

(三) 实施过程

1、路面数字化

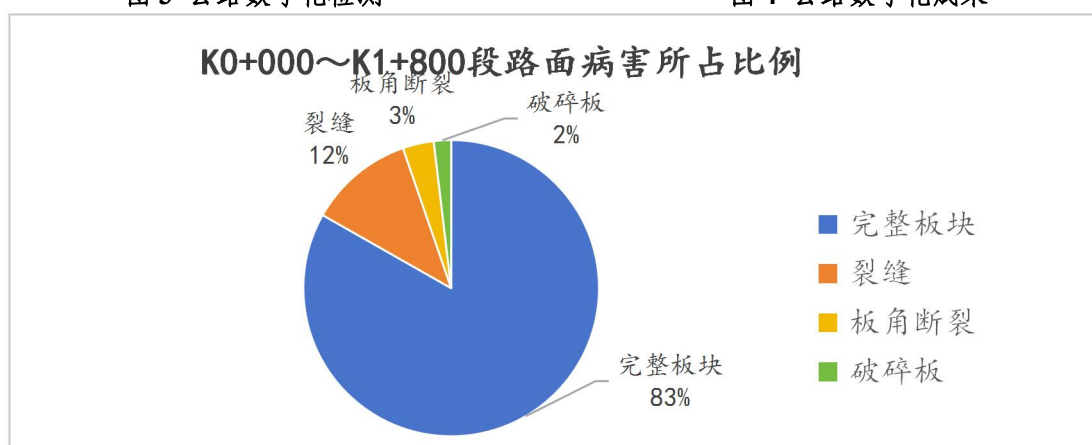
采用 RMDV-80 影像采集车，全域扫描实施路段，利用图像摄影技术、GPS 定位功能、计算机数据处理功能，将路面图像信息嵌入 GIS 地图，生成可视化路面图像。



图 3 公路数字化检测



图 4 公路数字化成果



2、脱空测定

采用智能声波检测仪、路用 FWA 智能检测车对旧路进行检测，通过声效特征曲线进行滤波、检波、仿真、数学变换等技术，自动计算出板底脱空阈值，判定板底脱空，同时对脱空程度及结构强度进行定量分析，检测数据实时上传至公路维护数字化平台。每块板检测 4 个板角，总测点数 1440 个脱空点数 561 个，占综测点数 38.96%。



图 5 水泥路面板底脱空及路用 FWA 智能检测



图 6 智能声波脱空检测结果

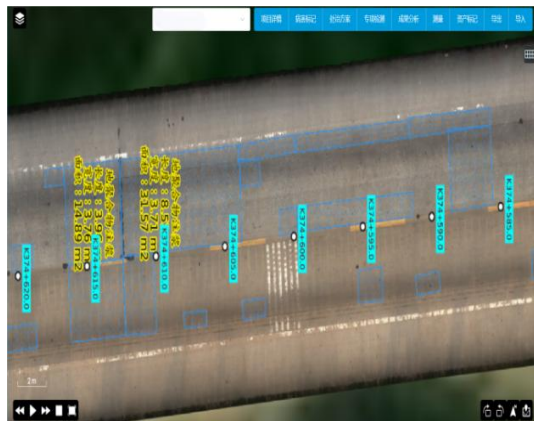


图 7 数字化处治方案

3、数字化加固

采用遥控智能钻孔、智能注浆设备和超高流动性的地聚合物注浆材料，对结构层缺陷区域进行针对性的渗透、填充、胶结、挤压密实，使其强度均质化。智能注浆监测系统实时传输注浆过程中压力、流量、坐标等的关键数据，依据预定的注浆压力设计值，系统自动化注浆。



图 8 遥控智能钻孔机



图 9 地聚合物注浆



图 10 注浆后效果



图 11 注浆实时智能监测系统

4、数字化再生

数字化加固后，依托公路维护数字化可视系统，采用智能微裂设备，击打水泥面板，使其产生均匀的微细裂缝，将水泥路面转换为一种“柔性”抗裂基层，从根本上解决反射开裂问题。



图 12 微裂施工现场



图 13 微裂施工数字化监控系统



图 14 微裂再生后效果

四、成本造价

全过程数字化水泥路面微裂均质化薄层加铺技术对比传统碎石化等工艺，全寿命周期成本更低，经济性更佳。

1、经济效益：旧路 100%利用，处治彻底，直接加铺面层，仅 4-6cm（传统需 15-25cm），使用寿命达 10 年以上，节省材料费 35%以上。通过智能检测+自动化施工精准定位病害，避免过度修复，降低隐性成本 30%。

2、社会效益：半幅封闭，微裂后即可通车，注浆后养生 4-6 小时可开放交通，工期只有传统工艺的 50%。

3、生态效益：施工过程中零废弃、零开挖、无扬尘、低噪音，有效减少废渣排放 740m³，降碳 230 多吨。

五、应用效果

留坝南楼路在病害采集、合成、识别、分析、处置采用全流程数字化，彻底解决沥青加铺层发射裂缝问题，实现养护数字化、绿色低碳化、施工快捷化、质量精细化、费用经济化。路段通车后调查结果显示，路面未出现任何形式的病害，PCI 指数保持 90 以上。



图 15 留坝县南楼路改造后运营效果

砂砾路面“冷再生”技术

青海省公路局

一、适用场景

砂砾路面“冷再生”技术是对原路面进行铣刨与拌合，再经平地机整平、洒水车洒水、压路机压实成型，最终形成新的路面。

该技术主要适用于高原生态敏感区的砂砾路面改造和养护。该地区生态环境脆弱，挖砂取料困难，极易导致环境破坏。通过利用现有路面材料就地冷再生作业，以较低成本、较小扰动，在较短的时间内改善砂砾路面路况，有效提升公路通畅水平和舒适度。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工工况

砂砾路面厚度不小于 20 厘米，采用“冷再生机+平地机+洒水车+压路机”等不同机械组合形式，充分利用现有路面材料一次性就地连续完成路面材料的铣刨、拌和、摊铺工序后，整平压实成型（砂砾路面“冷再生”技术 1.0 版）。在此基础上，掺入 4.5%水泥、百力固、复合道面增强剂、砂土路高效硬化剂、绿色高性能低造价水泥等，不断提高路面强度和耐磨性（砂砾路面“冷再生”技术 2.0 版）。

（二）设备投入

表 1 设备投入情况表

序号	名称	型号	数量	备注
1	冷再生机	XLZ2105SIV型	1	
2	振动压路机	徐工YZ20JC	1	
3	平地机	GR-180	1	
4	胶轮压路机	徐工XP261	1	
5	洒水车	东风EQ1126	1	

（三）工艺流程

调查原路面厚度、级配、超粒径、路拱等技术指标，选取最佳机械组合型式，一次性就地连续完成路面材料的铣刨、拌和、摊铺、压实成型。根据路段交通量、水文、地质等环境，可掺入一定添加剂，增强路面强度和整体性。铣刨过程中，通过人工+机械方式捡除超粒径，对级配不满足的砂砾料进行掺配，使其满足技术要求。路面改造完成后，同步对路基边坡及路侧生态进行修复，确保公路与周边环境深度融合。



图 1 实施工艺流程

（四）技术要点

1、铣刨、拌合。控制铣刨深度，湿拌过程中根据含水率加水，均匀拌合。

2、整平。刮出横坡，及时测量调整，条件允许下横坡尽量取上限。对施工条件受限、路基宽度小于 5m 且处于半填半挖路段设置单向坡。

3、压实。配齐压实设备，制定压实方案，在最佳含水率时碾压，每个部位尽可能同遍数碾压，公路两侧适当多压，碾压过程中路面保持湿润，初凝时间前完成。

4、横坡度。平地机整平、压路机静压一遍后立即检测横坡度，若不符合要求，及时进行调整。

三、工程应用情况

2023 年，专项投入资金 2000 万元，在海北州、黄南州、果洛州、玉树州地区，实施了 1018 公里路段作为试点改造项目。2024 年，在原试点基础上又投入资金约 1 亿元，在三江源地区选取 212 条乡道、村道约 5000 公里的砂砾路段应用该技术。2025 年，拟计划继续实施 2000 余公里的砂砾路面“冷再生”技术。



图 2 施工现场

四、成本造价

砂砾路面“冷再生”技术，就地取材、就地实施，省去了原建设过程

中材料采购、加工和运输环节，建设成本大幅降低，每公里建设成本仅为传统建设成本的十分之一。

表 2 砂砾路面“冷再生”技术与传统路面技术对比

技术类型	建安费 (万元/km)	设计 使用 年限	资源循 环利用	施工专 业化要 求	行车 舒适度	材料 需求
AC13-沥青混凝土罩面 (5cm)+水泥稳定碎石基 层(18cm)	73	8	中	高	高	高
C30水泥混凝土面层 (20cm)+水泥稳定碎石 基层(18cm)	101	10	低	中	中	高
砂砾路面冷再生	2~30	3-8	高	低	中	低

五、应用效果

砂砾路面“冷再生”技术，充分利用现有的砂砾路面材料，最大限度减少挖砂取料，降低对生态环境的干扰与破坏，省去了原建设过程中材料采购、加工和运输环节，降低建设成本。同时，施工工艺简单、工期短、效率高，后期养护方便，不仅改善了农牧区公路通行条件，相比水泥砼硬化路降低了雨雪天气出行安全风险，农牧民群众认可度极高，既满足了农牧区公路的出行需求，也实现了低碳、节能、环保的新突破。



图 3 应用实施效果

公路沥青路面冷再生技术

新疆维吾尔自治区吉木萨尔县交通运输局

一、适用场景

公路沥青路面冷再生技术适用于已达设计使用年限，路基病害较少，路面结构强度指数 $PSSI \geq 80$ 且路面损坏指数 $PCI \leq 90$ ，受地形限制且亟待改扩建的农村公路。具有造价低，建设周期短等特性。

二、施工工况及工艺流程

（一）施工工况

沥青路面在养护和改扩建施工时产生大量废旧材料，将废旧材料再生，既减轻了污染，又减少了材料消耗，同时能够大幅缩短项目建设周期。是实现公路交通运输可持续发展的的重要手段和迫切需要。

（二）材料要求

表 1 冷再生用乳化沥青技术要求

试验项目		单位	质量要求	试验办法
破乳速度		-	慢裂或中裂	T 0658
粒子电荷		-	阳离子 (+)	T 0653
筛上残留物 (1.18mm 筛)		%	≤ 0.1	T 0652
粘度	恩格拉粘度计法 E25	-	2~30	T 0622
	25℃ 赛波特粘度 VS	S	7~100	T 0623
蒸发残留物	残留物含量	%	≥ 60	T 0651
	溶解度	%	≥ 97.5	T 0607
	针入度 (25℃)	0.1mm	50~130	T 0604
	延度 (15℃)	cm	≥ 40	T 0605
与粗集料的粘附性，裹附面积		-	$\geq 2/3$	T 0654
与粗、细粒式集料拌合试验		-	均匀	T 0659
常温储存稳定性	1d	%	≤ 1	T 0655
	5d		≤ 5	

根据我国所应用的乳化沥青实际情况，将乳化沥青蒸发残留物 25℃ 针入度的技术要求调整为 50-130（0.1mm）。蒸发残留物含量指标，根据工程应用情况不低于 60%。

水泥作为再生结合料或者活性添加剂时，可采用普通硅酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥等，不应使用快硬水泥、早强水泥。水泥强度等级宜为 32.5 或 42.5，其技术指标应符合相应国标的有关要求。

（三）工艺流程

冷再生施工工艺：施工准备-冷再生机铣刨和拌合-碾压整形-再生现场试验控制-接缝处理-后续处理。

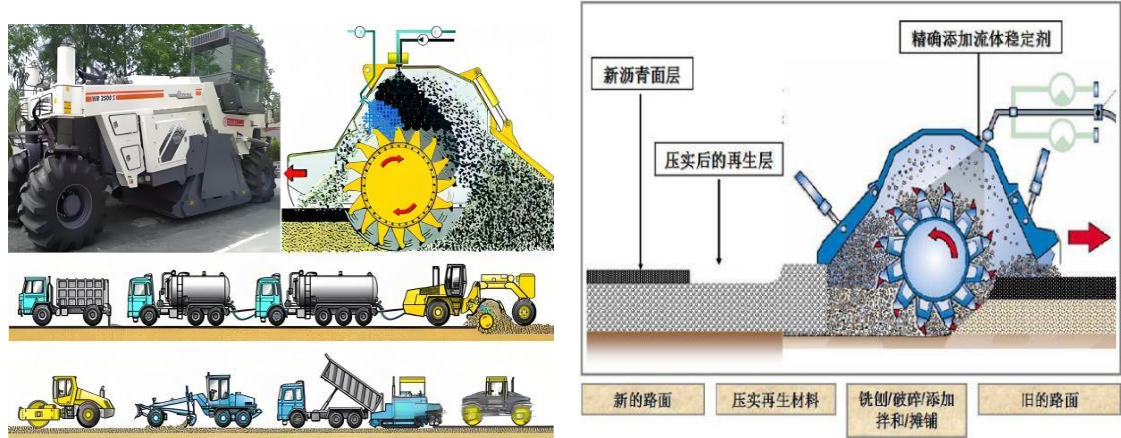
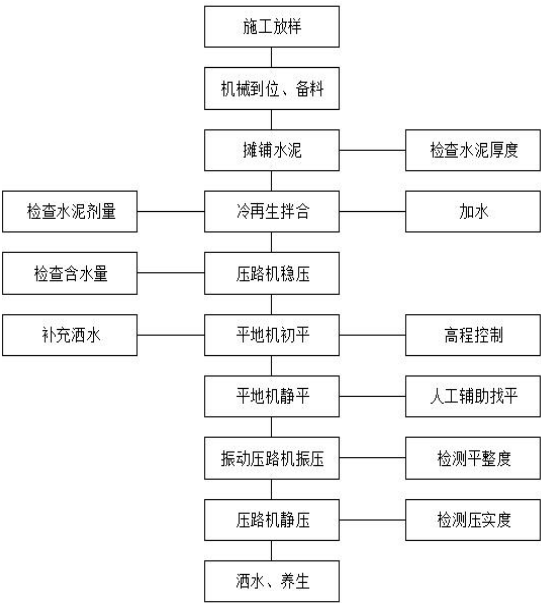


图 1 施工工艺流程图



三、工程应用情况

2023 年至 2024 年针对吉木萨尔县 2023 年大中修建设项目二期和吉木萨尔县 2022 年农村公路建设项目（第一批）两个项目采用了冷再生施工技术，通过冷再生技术，提升路面结构强度，降低了造价，大幅缩短建设周期。

四、成本造价

通过对比冷再生施工技术与传统施工方案对比，综合效益显著。对比内容如下：

表 2 传统施工方案与冷再生技术效益对比表

对比	传统方案：原有路面挖除改建	新方案：沥青路面冷再生	效益对比
典型结构	现有路面结构整体翻除后新建	现有沥青路面采用冷在生施工工艺处理后加铺沥青混凝土面层	厚度降低 > 80%
每平方造价	约 125 元/平	约 87.5 元/平	下降 > 30%
对老路利用程度	现有路面整体翻除，未进行充分利用，废弃量大	老路结构保留利用，基本不产生废弃工程	废料产生降低 > 90%
施工时间	60 天全封闭、开挖	30 天全封闭施工	下降 > 50%
附属设施	路缘石、人行道、管道全部调整	基本无需改造	影响小

五、应用效果

（一）建成前与建成后公路现状比较



图 2 公路现状照片（建成前）



图 3 公路现状照片（建成后）

（二）建成前与建成后现场基本情况

2023 年农村公路技术状况评定涉及项目路段 PCI 指数在 60-85 之间，综合评定等级为中，通过冷再生技术对沥青混凝土路面进行改造后，2024 年农村公路技术状况评定 PCI 指数提升至 80-95，综合评定等级为良。综上所述，沥青混凝土路面冷再生技术以最经济、最环保、最大限度缩短施工周期，可完成路基病害较少，路面结构强度指数 $PSSI \geq 80$ 且路面损坏指数 $PCI \leq 90$ ，受地形限制且亟待改扩建的农村公路的建设任务。

（三）结论

采用就地冷再生技术作业效率高，缩短工期；可完全利用废旧材料，避免废料填埋对环境的污染，同时减少开山采石对生态的破坏，有利于环境保护；降低施工成本，减少对交通的干扰；冷再生技术符合现代社会对于节能环保方面的要求，具有明显的经济效益与社会效益。