

# 橡胶沥青应力吸收层在公路路面改造中的应用研究

王冬冬

安徽建工嘉和工程科技有限公司 安徽蚌埠 233000

**【摘要】**对旧路面改扩建工程中反射裂缝多发问题展开技术方面的探究,研究橡胶沥青应力吸收层(SAMI)路用性能以及施工控制的方法。以某公路大修项目为依托,对废胎胶粉改性沥青的流变学特性以及它在层间应力传递中所起的耗散作用进行了系统的分析。通过确定严格施工工艺参数来确定原路面处治、材料配比、设备标定、碾压成型等环节的量化指标。根据长效性能监测数据可以得知,本结构层对于抑制半刚性基层收缩裂缝向上蔓延、提高路面整体抗疲劳寿命有较好的工程作用。研究所确定的精细化施工对策和质量评价体系,给同类公路维修改造工程提供了一种可以实施的技术性工程技术依据。

**【关键词】**橡胶沥青;应力吸收层;路面改造;反射裂缝;层间剪切

Research on the Application of Rubber Asphalt Stress Absorption Layer in Highway Pavement Renovation

Wang Dongdong

Anhui Jian Gong Jiahe Engineering Technology Co., Ltd., Bengbu, Anhui 233000

**【Abstract】**This study investigates technical solutions for addressing the frequent occurrence of reflective cracks in pavement renovation and expansion projects, evaluating the performance of rubber asphalt stress absorption layers (SAMI) and optimizing construction control methods. Based on a major highway rehabilitation project, the study systematically analyzed the rheological properties of waste tire rubber powder-modified asphalt and its role in dissipating interlayer stress. By establishing rigorous construction parameters, quantitative indicators were defined for pavement treatment, material mixing ratios, equipment calibration, and compaction processes. Long-term performance monitoring data demonstrate that this structural layer effectively prevents upward propagation of semi-rigid subbase shrinkage cracks and enhances overall pavement fatigue life. The refined construction strategies and quality assessment system developed in this study provide actionable technical guidelines for similar highway maintenance and renovation projects.

**【Key words】**rubberized asphalt; stress absorption layer; pavement rehabilitation; reflective crack; interlayer shear

## 1. 橡胶沥青应力吸收层作用机理与材料特性

### 1.1 废轮胎橡胶粉改性机理分析

废旧轮胎橡胶粉在高温液态基质沥青介质里发生复杂的物理溶胀和适度的化学降解反应,从根本上改变了原来沥青的胶体结构。胶粉颗粒把大量的沥青轻质组分(芳香分、饱和分)吸收进去以后,体积变得很大,在沥青基体内部形成一个三维的网状凝胶结构。高分子凝胶态物质大大增加了沥青的运动粘度和弹性恢复率,使改性沥青结合料在受到瞬态冲击荷载的时候,具有了类似于硫化橡胶的粘弹性特性,这是应力吸收层最基本的材料物理基础。

### 1.2 沥青混合料高低温流变性能

利用动态剪切流变仪(DSR)和弯曲梁流变仪(BBR)对橡胶沥青进行宽温域流变学测试,在60℃以上高温环境下,橡胶沥青的复数剪切模量( $G^*$ )明显增大,相位角( $\delta$ )也跟着减小,使橡胶沥青具有较好的抗车辙、抗剪切变形性能。-12℃以下温度下,橡胶沥青蠕变劲度模量 $S$ 急剧下降,蠕变速率 $m$ 值增大,说明该种材料低温收缩时有较好的柔韧性和应力松弛性。宽温域范围内流变学稳定性保证应力吸

收层四季交替都能保持相同的力学缓冲作用。

### 1.3 界面层剪切应力传递规律

路面结构层间力学连续性很大程度上依靠界面剪切应力有效传递。橡胶沥青应力吸收层属于低弹性模量夹层,它把传统路面结构里应力由上到下线性递减的分布方式改变了。车辆水平制动力、垂直轮载的复合作用,高粘度橡胶沥青和单一粒径碎石紧紧黏合在一起,在层间形成了一个抗剪强度很高的嵌锁结构。该结构可以把集中剪切应力分散到更广阔的平面区域里,防止由于局部应力过大而引起层间滑移、拥包、剥落等现象。

### 1.4 裂缝尖端应力强度因子演化

根据非线性断裂力学理论进行有限元数值模拟,可以清楚地看出SAMI对于裂缝的扩展起着阻滞的作用。底层旧路面有宏观裂缝的时候,裂缝尖端受到外部荷载的影响会产生很高的应力强度因子( $K_I$ 和 $K_{II}$ )。橡胶沥青应力吸收层介入之后,裂缝尖端的应力场就被大范围地重新分布了。柔性层自身所产生的剪切变形吸收大部分的应变能,使传到新加铺面层底部的应力强度因子呈指数衰减,从根本上推迟了反射裂缝的产生和扩大。

## 2. 橡胶沥青 SAMI 施工技术参数

在某公路大修工程中,材料性能的充分发挥很大程度上

依靠科学、严谨的施工技术参数的确定。表1详细列出某公路改造项目橡胶沥青核心技术指标的测试数据,为后面施工提供标准。

表1 橡胶沥青核心技术指标测试数据表

测试项目	规范技术要求	实际检测平均值	达标情况
针入度 (25℃, 100g, 5s) / 0.1mm	40 ~ 60	52.4	合格
软化点 (TR&B) / °C	≥ 60	68.7	合格
180℃ 运动粘度 / Pa · s	1.5 ~ 4.0	2.85	合格
弹性恢复 (25℃) / %	≥ 70	82.3	合格
碎石集料压碎值 / %	≤ 15	11.2	合格

### 2.1 原路面铣刨与基层病害处治标准

旧路面的表面状况直接影响应力吸收层附着的好坏以及层间嵌锁的效果。施工前用细齿铣刨鼓精铣刨机对原路面进行拉毛处理,铣刨深度控制在 1.5cm ~ 2.0cm,彻底清除表面老化层、泛油区和橡胶轮胎印迹。对宽度大于 3mm 的既有裂缝进行高压吹风清缝、灌注热熔型改性密封胶;对沉陷、松散区域采用局部切割换填半刚性基层材料的方式,保证原路面平整度达到 3m 直尺检测间隙小于 5mm 的硬性技术要求。

### 2.2 橡胶沥青同步碎石封层洒布量控制

根据原路面构造深度、孔隙率等参数来确定橡胶沥青的洒布量,才是整个施工过程的关键环节。现场铺盘试验及标定,使橡胶沥青喷洒量控制在  $2.2\text{kg}/\text{m}^2 \sim 2.6\text{kg}/\text{m}^2$  之间。洒布量太小会造成沥青不能很好地包裹碎石底部,降低层间粘结力,洒布量过大则会在高温季节造成严重的泛油病害。施工时用高精度智能沥青洒布车,用车载计算机实时闭环控制泵送流量和车速的比值。

### 2.3 碎石集料粒径级配与预裹覆工艺

应力吸收层只用一种粒径的玄武岩碎石做骨料,在工程中选择粒径为 9.5mm-13.2mm 的高洁净度石料。为了消除碎石表面的微粉尘,提高碎石与高粘沥青的裹附效果,在洒布

前需要对碎石进行 0.3% 到 0.5% 基质沥青的加热预裹覆。预裹覆后的碎石表面形成了很薄的沥青油膜,撒布量控制在  $12\text{m}^3/1000\text{m}^2 \sim 14\text{m}^3/1000\text{m}^2$  之间,使碎石在沥青层中覆盖率达到 80% ~ 90%,达到满铺而不重叠的效果。

### 2.4 碾压成型温度梯度与压实度指标

橡胶沥青具有较高的粘度,因此碾压工作要在一个非常短的时间和温度范围内迅速完成。喷洒后的橡胶沥青温度要保持在 180℃ ~ 190℃ 的高温状态,碎石撒布机紧跟其后作业,两者的间隔时间不能超过 3 秒。采用 26 吨以上的重型胶轮压路机碾压,严禁使用钢轮压路机以免损坏集料颗粒。碾压遍数控制在 3 ~ 4 遍,初压温度不小于 160℃,终压温度不小于 120℃,利用胶轮的揉搓作用使碎石深陷到沥青层里,嵌固深度要达到碎石粒径的 2/3 以上。

## 3. 橡胶沥青应力吸收层工程应用效果与质量控制对策

为了客观评价橡胶沥青应力吸收层实际工程效果,对铺装橡胶沥青应力吸收层的试验路段进行两年的跟踪观测,路面使用性能指标对比数据见表 2。

表2 试验路段改造前后路面使用性能监测数据对比

监测指标	改造前旧路面状态	加铺 SAMI 后第 1 年	加铺 SAMI 后第 2 年	改善幅度评价
路面横向裂缝率 / (m/1000m <sup>2</sup> )	85.4	2.1	5.3	显著降低
车辙深度 (RD) / mm	18.6	3.2	4.8	大幅改善
路面平整度 (IRI) / (m/km)	4.52	1.15	1.32	明显提升
渗水系数 / (mL/min)	125	0 (完全阻水)	0 (完全阻水)	结构防水极佳

### 3.1 洒布不均导致的泛油与脱粒防治

沥青洒布车起步和终止时,由于管路压力不稳定会造成“斑马线”式的洒布不均匀。施工现场应于起步和接缝处铺设建筑用牛皮纸做物理隔离遮挡,洒布车稳定工作速度、喷洒压力后方可进入正式工作面。对由于喷嘴局部堵塞造成条带状缺油的喷嘴及时进行补洒。对于由于碎石撒布过多造成的局部脱粒,在碾压前必须用人工用竹扫帚将多余的重叠碎石扫除,防止因为碎石没有粘结力而在开放交通后造成飞石隐患。对泛油病害的微观演化机理进行详细的分析,过量的橡胶沥青在夏季高温和重载车轮的反复揉搓下,内部的凝胶

网络结构就会发生不可逆的剪切屈服,使得液态游离沥青向上迁移并淹没集料的微观纹理。为了避免以上风险发生,现场工程师应该使用超声波测距仪对喷油杆离地高度进行实时校准,使相邻喷嘴喷射出的扇形沥青膜在空间上互成 120 度角,三重叠合。环境风速对高粘沥青雾化形态的干扰也不能小视,当阵风风速大于四级时,细微的沥青液滴就会发生严重的漂移,直接破坏设计洒布量的均匀度分布,这时必须强制中止施工作业来保证结构层的先天质量。

### 3.2 施工界面层间粘结力衰减控制

界面层间粘结力衰减大多是由施工过程中层间物理污

染和热力学温度散失造成的。施工路段应实行严格封闭交通管制,禁止一切非施工车辆进入已经铣刨清扫完成的工作面。技术人员对橡胶沥青加工过程中胶粉反应时间(一般控制在45-60分钟)进行严格的控制,防止由于发育时间不够造成沥青粘度不合格,或者由于过热造成橡胶多聚链段断裂老化。采用现场钻芯取样进行室内斜剪试验,要求芯样的层间抗剪强度在25℃时不得小于0.8MPa,作为粘结质量评价的刚性指标。从热力学角度看,橡胶沥青接触到冷态原路面时会产生剧烈的温度梯度骤降,热量流失直接减弱了沥青对下卧层微孔隙的毛细润湿效果,界面分子间的范德华力吸附作用也被大大削弱。工程团队为了补偿由于热量损失而造成的温度下降,在低温季节施工前需要使用大功率微波加热车对原路面进行预热处理,使基层表面温度达到50℃以上。室内剪切破坏面形态学分析显示,当破坏模式由混合料内部的内聚破坏变为界面的粘附性破坏的时候,一般意味着层间还存在着未清除净的粉尘隔离层,这时前置清扫工序就要引入负压吸尘设备,彻底清除微米级颗粒物对层间嵌锁效应的负面影响。

### 3.3 交通荷载下抗反射裂缝疲劳寿命评估

根据重载交通路段实际复杂的工况,对应力吸收层的疲劳寿命进行评估时要使用动态模量衰减模型和断裂力学理论。长期的轴载累积作用会使橡胶沥青层出现微观疲劳损伤,即弹性恢复能力慢慢变差。工程措施是改善加铺面层厚度力学组合,形成SAMI+较厚中面层+高强上面层的结构形式,使上部结构分担一部分荷载,减小传递到吸收层的拉应变。定期使用落锤式弯沉仪(FWD)检测路面结构的动态弯沉盆数据,反算各个构造层的模量衰减速率,为生命周期内预防性养护提供数据支持。移动轮载在路面结构内产生的应力场是十分复杂的,旧路面裂缝尖端同时受到张开型(I型)和剪切型(II型)复合断裂模式的冲击。橡胶沥青层由于具有很好的粘弹性阻尼性能,成为了一个巨大的应变耗散器,把集中产生的破坏性能量转化成热能向外扩散。技术人员把FWD得到的多传感器时程数据输入非线性反算软件,得到了一个拟合度很高的路面结构衰变曲线。该曲线不但准确地反映了SAMI层经过百万次标准轴载(BZZ-100)后刚度折减的轨迹,而且给决策者制定准确的铣刨重铺周期提供了一个非常有力的量化依据,完全克服了以前依靠经验判断的盲

目性。

### 3.4 摊铺设备行进速度与喷出压力匹配调节

同步碎石封层车机械协同性能的好坏直接影响到成型后路面的整体质量。沥青泵的排量要和车辆的行驶速度成正比,也就是要有一定的数学关系式。坡道和弯道施工区段,车辆行驶阻力发生变化时,车载控制系统要具备毫秒级的反应速度,对沥青阀门开度、碎石下料辊转速等进行自动调节。常规平直路段车速为4km/h~6km/h,沥青喷洒压力为0.4MPa~0.6MPa,使沥青扇形喷雾重叠率达到三重叠标准,保证全幅路面无盲区、均匀受力。高粘度橡胶沥青在管路内流动时具有明显的非牛顿流体特性,喷洒系统必须配备大功率导热油加热保温套管,防止管壁处的流体由于温度下降而造成粘度急剧增加甚至凝固。现代化的同步碎石车内部装有基于PID算法的工业可编程逻辑控制器(PLC),它把雷达测速仪给出的实时车速同设定好的理论洒布量进行比较,从而产生模拟信号去调节液压马达的转速。碎石料仓内物料架桥、卡滞的现象同样会成为破坏撒布均匀度的隐形杀手,设备操作人员要时刻注意料斗内物料的流态变化,及时启动高频激振器打破石头的起拱效应,保证集料以恒定的质量速率均匀地落入到沥青油膜里,从而形成一个致密、连续的骨架嵌挤网络。

## 结论

橡胶沥青应力吸收层在公路路面维修改造工程中,用高粘弹改性材料和单一粒径碎石物理嵌挤相结合的方法,创建起阻止断裂缝向上传播的力学缓冲层。研究发现废胎胶粉的溶胀改性反应使结合料具有较好的宽温域流变性能,能很好地分散层间破坏性剪切应力。经过对原路面精细处治、喷洒量精准闭环标定、预裹覆碎石级配控制和高温碾压成型等主要施工参数进行严格的控制,可以最大限度地发挥该结构层的抗反射裂缝和防水密封作用。长效性能监测数据证明了精细化施工控制策略对于延长路面服役寿命、抑制车辙和裂缝病害发展有很好的工程应用价值。创建包含设备动态匹配调节和界面热力学粘结力评价在内的综合性质量体系,是这种低碳环保改造工程技术体系的主要部分。

## 参考文献

- [1]王达. 废旧轮胎橡胶沥青在公路养护工程中的应用[J]. 交通世界, 2026, (10): 64-66.
- [2]龙益辉. 在低碳公路上应用的温拌橡胶沥青技术及其效益分析[J]. 广东建材, 2026, 42 (03): 90-93.
- [3]宋茜. 橡胶改性沥青的技术进展与应用前景[J]. 中国橡胶, 2026, 42 (03): 61-65.
- [4]刘柏强,姜大勇. 高速公路橡胶沥青路面结构力学性能分析[J]. 价值工程, 2026, 45 (08): 16-18.
- [5]吴春根. 橡胶沥青混合料在公路改扩建工程中的应用[J]. 交通世界, 2026, (Z1): 48-50.