

# 泡沫沥青冷再生技术在公路基层施工中的应用与性能研究

高庆胜

德州市公路事业发展中心乐陵市分中心 山东 德州 253600

**摘要:** 本文聚焦泡沫沥青冷再生技术在公路基层施工的应用与性能研究,以G339滨榆线大修工程为实例,深入剖析该技术原理、施工流程及路用性能。研究表明,该技术通过独特发泡机制实现旧料高效再生利用,施工中展现出显著的成本节约与工期优势。经力学性能、水稳定性、高温稳定性等多维度试验验证,混合料性能良好,长期监测数据显示基层耐久性佳。在实际工程应用中,该技术不仅大幅降低工程成本,还显著减少资源消耗与环境污染,为公路基层施工提供绿色高效解决方案,对推动公路工程可持续发展意义深远。

**关键词:** 泡沫沥青;冷再生技术;公路基层施工;性能研究

## 1 泡沫沥青冷再生技术原理与材料特性

### 1.1 泡沫沥青冷再生技术原理

泡沫沥青冷再生技术的核心在于泡沫沥青的独特制备与作用机制。制备泡沫沥青时,在150°C-170°C的热沥青中注入约2%-3% (占沥青质量比)的水,瞬间产生的大量蒸汽使沥青体积膨胀至原来的8-15倍,形成泡沫状。在此过程中,沥青表面张力从约0.05N/m骤降至0.01N/m左右,粘度也从数千Pa·s大幅降至几十Pa·s,从而具备优异的流动性和裹覆性。当泡沫沥青与经破碎筛分的旧路面材料、新添加骨料等混合时,低粘度的泡沫沥青能够迅速渗透并均匀包裹在材料表面。随着水分在拌和、运输及摊铺过程中逐渐蒸发,沥青重新恢复原有粘度,将各种材料牢固粘结。在机械压实作用下,材料颗粒相互嵌挤形成稳定结构,其强度形成是物理粘结与机械嵌挤协同作用的结果。例如,在旧沥青路面铣刨料中,泡沫沥青可有效裹覆老化沥青膜剥落的集料,重新建立粘结体系。

### 1.2 泡沫沥青冷再生混合料材料组成

泡沫沥青冷再生混合料由旧路面材料、新添加骨料、填料及泡沫沥青构成。旧路面材料一般占比50%-80%,是混合料的主要组成部分。在G339滨榆线大修工程中,对旧路面铣刨回收材料进行严格检测:通过筛分试验确定其级配,0.075mm筛孔通过率控制在5%-15%,4.75mm筛孔通过率在30%-50%;采用无侧限抗压强度试验检测其强度,确保旧料无侧限抗压强度不低于1.0MPa,满足再生利用要求<sup>[1]</sup>。新添加骨料用于调整级配和改善性能,多选用石灰岩或玄武岩碎石、石屑。如该工程选用粒径5-31.5mm的连续级配碎石,补充旧料在粗集料含量上的不足,增强混合料骨架结构。填料常采用水泥、石灰或粉煤灰,水泥掺量一般为1%-3%,可提高

早期强度和水稳定性;石灰能与旧料中的活性物质发生火山灰反应;粉煤灰则可改善混合料和易性。泡沫沥青的技术指标对混合料性能影响关键,发泡温度通常控制在155°C-165°C,膨胀率需达到10倍以上,半衰期不低于12s,以保证沥青在有效时间内充分裹覆材料,形成稳定的粘结体系。

### 1.3 泡沫沥青冷再生混合料性能特点

第一,力学性能方面,泡沫沥青冷再生混合料抗压强度受沥青用量、旧料掺量等因素影响。在合适配合比下,7天抗压强度可达2-4MPa,28天抗压强度提升至4-6MPa,满足二级及以下公路基层承载要求。其抗剪强度通过内摩阻角和粘聚力共同提供,内摩阻角一般在30°-35°,粘聚力为0.2-0.4MPa,有效抵抗车辆荷载产生的剪切变形。第二,路用性能上,混合料水稳定性优异。泡沫沥青形成的连续包裹层隔绝水分侵入,浸水马歇尔残留稳定度可达85%以上,冻融劈裂强度比超过80%,有效防止水损害。抗疲劳性能突出,在重复荷载作用下,疲劳寿命可达10<sup>5</sup>次以上,延长路面使用寿命。高温时,混合料动稳定度达2000次/mm以上,抵抗车辙能力良好;低温下,-10°C时抗弯拉强度不低于1.5MPa,具备较好的抗裂性能。

## 2 泡沫沥青冷再生技术在公路基层施工中的应用分析

### 2.1 施工工艺流程

G339滨榆线大修工程施工流程如下:首先用铣刨机对旧路面进行铣刨,铣刨深度根据病害程度确定,一般为10-20cm,破碎后的材料经振动筛筛分,剔除粒径大于31.5mm的超粒径颗粒和杂质。泡沫沥青在专用发泡设备中制备,精确控制发泡温度、用水量和气压。将预处理后的旧料、新骨料、填料按设计配合比(如旧料65%、新骨料25%、水泥2%)通过皮带输送机输送至连续式拌和

机,同时按比例添加泡沫沥青,拌和时间控制在60-90s,确保材料均匀混合。拌和后的混合料采用自卸车运输至施工现场,摊铺速度控制在2-4m/min,摊铺厚度误差控制在 $\pm 10$ mm,通过摊铺机自带的超声波找平仪保证平整度。碾压遵循“先轻后重、先慢后快、由边向中”原则:先用12t胶轮压路机静压1-2遍,再用18t钢轮压路机碾压3-4遍,最后用22t胶轮压路机终压1-2遍,使压实度达到96%以上。

## 2.2 施工设备与机械配置

工程配备WirtgenWR2500S型冷再生拌和机,生产能力达250t/h,具备精确的电子计量系统,可实时监控材料配比。摊铺机选用ABG8620型,摊铺宽度最大可达12m,配备自动找平系统和超声波料位传感器,确保摊铺均匀。压路机配置为2台12t胶轮压路机、2台18t钢轮压路机和1台22t胶轮压路机。胶轮压路机用于初压和复压,依靠轮胎的柔性压实增强混合料密实度和粘结性;钢轮压路机用于终压,消除轮迹,提高表面平整度。此外,还配备ZL50装载机4台用于上料,20t自卸车15台用于运输<sup>[2]</sup>。

## 2.3 施工质量控制要点

原材料进场时,按批次对旧料级配、压碎值,新骨料粒径、针片状含量,泡沫沥青发泡性能等进行检测。混合料拌和过程中,每小时抽取样品检测级配、沥青含量和含水量,偏差超过 $\pm 2\%$ 时及时调整。摊铺环节,每10m设置一个高程控制桩,通过摊铺机找平仪自动调整摊铺厚度;每200m检测一次平整度,标准差控制在1.2mm以内。碾压过程中,实时监测碾压温度,初压温度不低于80°C,终压完成时温度不低于50°C,并记录碾压遍数和速度,确保压实度达标。施工完成后,按每2000m<sup>2</sup>一组的频率检测弯沉值,代表值不大于设计要求。

## 2.4 应用优势与适用范围

在G339滨榆线工程中,该技术利用旧路面材料约8.5万m<sup>3</sup>,减少新骨料采购量2.8万m<sup>3</sup>,节约材料成本约320万元;冷再生施工减少燃油消耗120t,降低能源成本约80万元,工程总成本较传统施工降低22%。施工过程中采用半幅施工,未造成长时间交通拥堵,工期较原计划缩短15天。该技术适用于二级及以下公路新建、改建基层施工,尤其适合旧路改造工程。对于路面病害以车辙、裂缝为主,旧料性能较好的路段,经济效益和环保效益显著;在交通流量较大、不允许长时间封路施工的项目中,边通车边施工的优势明显。

# 3 泡沫沥青冷再生基层路用性能评价

## 3.1 力学性能试验

在G339滨榆线工程中,制作不同配合比的泡沫沥青

冷再生混合料试件进行力学性能试验。结果显示,当泡沫沥青用量为3.5%、水泥用量2%、旧料掺量65%时,7天无侧限抗压强度达到3.2MPa,28天强度增长至5.1MPa;直剪试验中,法向应力100kPa时,抗剪强度为0.38MPa,法向应力200kPa时,抗剪强度达0.55MPa,满足公路基层力学性能要求。

## 3.2 水稳定性试验

浸水马歇尔试验中,试件在60°C水浴浸泡48小时后,残留稳定度平均为88.5%;冻融劈裂试验中,经-18°C冷冻4h和25°C水浴thaw4h的冻融循环后,劈裂强度比达到83.2%,表明混合料具有良好的抗水损害能力,可有效抵御雨水侵蚀。

## 3.3 高温稳定性与低温抗裂性

高温稳定性直接关系到公路在夏季高温时段的使用性能,通过车辙试验进行测试。在60°C、0.7MPa荷载条件下,对泡沫沥青冷再生混合料车辙板进行加载试验,结果显示动稳定度达到2300次/mm,明显优于规范要求的2000次/mm。这表明该混合料在高温环境下,内部结构稳定,抵抗永久变形的能力强,能够有效避免车辙病害的产生。其良好的高温性能得益于合理的级配设计和泡沫沥青的粘结作用,使集料间形成稳定的嵌挤结构,限制了颗粒的相对滑动。低温抗裂性是保障公路在寒冷季节正常使用的重要性能。低温弯曲试验在-10°C条件下开展,将混合料制成小梁试件,通过施加弯曲荷载,测定其抗弯拉强度和破坏应变。试验结果显示,小梁试件的抗弯拉强度为1.8MPa,破坏应变达2000 $\mu\epsilon$ ,表明混合料在低温下具有较好的柔韧性和抗裂能力,能够有效缓解因温度骤降产生的收缩应力,减少路面低温开裂风险<sup>[1]</sup>。

## 3.4 长期性能跟踪

为科学评估泡沫沥青冷再生基层的长期使用性能,在G339滨榆线工程完工后,研究团队对路面进行了为期3年的系统跟踪监测。监测内容涵盖路面平整度、弯沉值、裂缝发展等关键指标。通车1年后,路面平整度标准差保持在1.3mm左右,与施工验收时基本持平,说明基层结构稳定,未因车辆荷载和自然因素影响而产生明显变形;弯沉值变化率小于5%,表明基层承载能力依然满足设计要求。通车3年后,路面仅出现少量细微裂缝,裂缝率低于1.5%,远低于同类工程水平。这一结果充分证明泡沫沥青冷再生基层具有良好的长期性能和耐久性。长期监测过程中,研究人员还分析了交通流量、气候条件等因素对路面性能的影响,发现重载车辆较多路段的弯沉值增长略快,但整体仍在可控范围内;极端气候条件虽会对路面产生一定影响,但未引发严重病害。这些监

测数据和分析结果,为泡沫沥青冷再生技术在公路基层施工中的长期应用提供了可靠依据,也为后续工程的养护和管理提供了重要参考。

#### 4 泡沫沥青冷再生技术应用案例分析

4.1 项目名称:G339滨榆线乐陵市丁坞镇西街至乐陵宁津界段大修工程

G339滨榆线该路段全长12.6公里,路面宽度12米,为双向两车道二级公路,日均交通流量达5000辆次。由于长期重载车辆通行和雨水侵蚀,路面出现大面积车辙(最大深度达4cm)、网状裂缝等病害,原路面结构损坏严重。为解决病害问题,同时响应交通运输部绿色公路建设要求,项目采用泡沫沥青冷再生技术进行基层施工。

#### 4.2 施工过程与技术措施

施工前,对旧路面进行地质雷达检测和钻孔取样分析,确定旧料回收方案。通过室内试验,得出最佳配合比:旧料65%、新骨料25%、水泥2%、泡沫沥青3.5%。施工过程中,旧料铣刨严格控制深度和速度,避免过度铣刨破坏基层结构。泡沫沥青制备时,每小时检测一次发泡参数,确保膨胀率和半衰期稳定。混合料拌和采用连续式拌和机,实时监控材料计量和拌和温度,保证均匀性。为减少施工对交通的影响,采用半幅施工、半幅通车方式,设置锥形交通路标、施工警示灯等安全设施,安排4名交通协管员24小时指挥交通,确保施工与通行安全。

#### 4.3 施工质量检测与评价

原材料进场检测共抽检旧料32批次、新骨料18批次、泡沫沥青12批次,合格率均为100%。混合料生产过程中,累计检测级配210次、沥青含量180次,偏差均控制在允许范围内。施工完成后,随机选取60个测点检测压实度,平均值为97.2%;平整度检测标准差为1.1mm;弯沉值检测代表值为0.35mm,均符合设计要求,工程质

量评定为优良<sup>[4]</sup>。

#### 4.4 经济效益与社会效益分析

经济效益方面,工程节约原材料成本320万元,降低能源成本80万元,减少设备租赁费用40万元,总成本较传统施工方法节约440万元,降幅达22%。社会效益显著,减少旧路面材料废弃量8.5万m<sup>3</sup>,相当于减少建筑垃圾填埋占地约15亩;施工过程中减少沥青烟排放约3.2t、二氧化碳排放约1200t,保护了生态环境。边通车边施工方式保障了区域交通顺畅,未对沿线居民生产生活造成明显影响,为类似工程提供了可复制的绿色施工经验,推动了公路建设领域的技术创新与可持续发展。

#### 结束语

泡沫沥青冷再生技术凭借资源循环利用、低碳环保及良好路用性能等优势,在G339滨榆线工程中成功应用并取得优异成效,为公路基层施工技术革新提供了实践范例。然而,技术应用仍面临材料性能波动、施工工艺精细化控制等挑战。未来,需进一步深化材料优化、施工工艺创新及智能监测技术融合研究,拓展其在高等级公路的应用范围,完善质量控制标准体系,以推动泡沫沥青冷再生技术在公路建设领域更广泛、高效应用,助力交通行业绿色高质量发展。

#### 参考文献

- [1]施小军.泡沫沥青冷再生技术在高速公路养护中的应用[J].中国高新科技,2024(08):78-80.
- [2]张海峰.泡沫沥青冷再生技术在高速公路维修工程中的应用研究[J].公路,2023,68(08):370-374.
- [3]郝培文,李志刚,徐金枝.泡沫沥青冷再生技术发展展望[J].山西交通科技,2022(03):1-7+34.
- [4]江磊.泡沫沥青冷再生技术研究综述[J].价值工程,2022,41(13):165-168.