

高速公路桥梁隧道路面施工中的温拌沥青技术与应用研究

杨帆

温岭市交通旅游集团有限公司 浙江 台州 317500

摘要: 温拌沥青技术通过调控沥青流变特性降低施工温度,在桥梁隧道路面施工中展现出显著优势。本文围绕温拌沥青技术原理与分类展开论述,分析在施工环境优化、路用性能保障及施工灵活性提升等方面的应用价值,探讨材料选择、设备改进及工艺控制等关键技术,指出技术推广面临的成本、性能验证及标准化挑战,提出材料创新、智能化施工及绿色低碳技术集成等发展方向,为桥梁隧道路面施工提供技术参考。

关键词: 温拌沥青技术;桥梁隧道路面;施工环境优化;路用性能;智能化控制

引言:高速公路桥梁与隧道建设对路面施工提出严格要求,传统热拌沥青技术因高温作业易引发沥青烟污染、桥梁结构热变形及施工窗口受限等问题,难以满足复杂工程场景需求。温拌沥青技术通过调控沥青流变特性降低施工温度,在改善作业环境、保障路用性能及提升施工灵活性方面展现出独特优势。其技术核心在于平衡低温施工与性能保持的关系,通过材料创新与工艺优化,为桥梁隧道路面施工提供更安全、高效、环保的技术路径。

1 温拌沥青技术原理与分类

1.1 技术原理

温拌沥青技术通过物理或化学手段调控沥青的流变特性,在降低施工温度的同时维持混合料的路用性能^[1]。其核心机制在于削弱沥青分子间的内聚力,减少拌和过程中集料表面沥青膜的粘滞阻力,从而降低混合料的粘度。这一过程需平衡温度下降与性能保持的关系,确保混合料在低温条件下仍具备足够的抗变形能力、抗裂性能及水稳定性。具体而言,物理降粘通过改变沥青的微观结构实现,如引入润滑介质或发泡体系;化学降粘则依赖添加剂与沥青组分的相互作用,形成低粘度过渡相。技术实施的关键在于精准控制降粘幅度,避免因温度过低导致压实困难或性能衰减,同时需保证混合料在服役阶段的高温稳定性、低温抗裂性及耐久性不受显著影响。

1.2 主要技术类型

表面活性剂法通过向沥青中引入极性分子,在集料表面形成定向排列的水膜层,降低沥青与集料间的摩擦阻力。碾压过程中水膜破裂,活性分子与集料表面发生化学吸附,增强界面粘附强度。有机降粘剂法采用低熔点有机材料,如天然蜡或合成酯类,在拌和温度下熔化并释放液态组分,稀释沥青基质以降低粘度。冷却后有材料重新结晶,形成网状结构以维持混合料强度。泡

沫沥青法利用发泡装置向高温沥青注入少量水,水汽化膨胀形成大量微小气泡,增大沥青体积并降低表观粘度,同时气泡破裂后沥青恢复连续相,确保压实效果。沥青-矿物法通过添加合成沸石等多孔矿物,利用矿物内部孔隙吸附水分,拌和时水分释放形成局部发泡效应,实现沥青粘度的瞬时降低,且矿物颗粒可增强混合料骨架稳定性。

2 温拌沥青在桥梁隧道路面施工中的技术优势与应用场景

2.1 施工环境优化与应用场景

温拌沥青技术通过降低施工温度显著改善桥梁隧道的作业环境。在隧道施工中,传统热拌沥青产生的沥青烟与粉尘易在封闭空间内积聚,威胁施工人员呼吸系统健康^[2]。温拌技术将拌和温度降低,减少挥发性有机物释放,配合隧道通风系统可有效稀释有害气体浓度,降低职业病风险。桥梁高空作业场景下,热拌沥青的高温易导致钢箱梁等结构热胀变形,影响施工精度,而温拌沥青的低温特性可减弱热应力对桥梁结构的扰动。此外,低温或潮湿环境是传统热拌沥青的施工禁区,温拌技术通过延缓混合料冷却速率,突破季节性限制,在春秋季节低温或雨后潮湿条件下仍可保证压实质量,延长有效施工周期。

2.2 路用性能保障与应用需求

针对桥梁隧道的重载交通特性(轴载 $\geq 130\text{kN}$ 、日交通量超2万辆次),温拌沥青通过级配优化与添加剂复配提升抗车辙能力。细集料比例的精准控制(4.75mm以下颗粒含量 $\leq 35\%$)与硬质岩碎石(如玄武岩,洛杉矶磨耗值 ≤ 28)的使用可增强骨架嵌挤作用,配合高弹性改性剂(如SBS掺量3%-5%)弥补低温施工对混合料刚度的影响,使动稳定度提升至6000次/mm以上,满足重载交通需求。抗裂性能方面,温拌沥青的低温拌和特性(拌和温度降低30-40°C)减少了沥青在高温下的氧化老化

(老化指数降低20%~30%),延缓了沥青硬化的进程(针入度比提高15%~20%),从而降低温度收缩裂缝的产生概率(裂缝间距延长至50~80m)。通过引入高黏度改性沥青(60°C粘度 $\geq 20000\text{Pa}\cdot\text{s}$)或聚酯纤维稳定剂(掺量0.3%~0.5%),可进一步抑制疲劳裂缝的扩展(疲劳寿命提高2~3倍)。在隧道潮湿环境中,温拌沥青混合料的水稳定性优势显著,其较低的空隙率(4%~6%)与优化的矿料级配(关键筛孔通过率符合高性能沥青路面设计要求)可有效阻隔水分渗透(水损害指数降低40%~50%),配合憎水性添加剂(如硅烷类,掺量0.1%~0.2%)的使用,可防止水损害引发的集料剥落与坑槽病害,延长路面使用寿命至15年以上。

2.3 施工灵活性提升与应用策略

温拌沥青的低温特性赋予施工过程更高的灵活性。混合料在储运阶段因粘度变化缓慢,允许更长的运输距离与中转时间,特别适用于偏远山区桥梁或特长隧道的施工场景。夜间施工时,温拌技术可削弱昼夜温差对压实质量的影响,避免因温度骤降导致的压实度不足问题。在桥梁伸缩缝、隧道洞口等几何形状复杂的部位,温拌混合料良好的工作性使其更易填充密实,减少人工修补频次。通过调整温拌剂掺量,还可实现混合料开放交通时间的精准控制,满足桥梁隧道分阶段施工的进度要求。

3 温拌沥青在桥梁隧道路面施工中的关键技术与应用方法

3.1 材料选择与配合比设计

3.1.1 沥青标号与温拌剂匹配

温拌沥青的性能实现依赖于基质沥青与温拌剂的协同作用。针对桥梁隧道重载交通特性,宜选用PG76-22及以上等级的高黏度改性沥青,其60°C动力黏度指标需满足不低于 $20000\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的要求,以确保混合料具备足够的抗车辙能力。温拌剂体系推荐采用表面活性剂与有机降粘剂的复合方案,其中表面活性剂通过形成水膜降低沥青粘度,有机降粘剂(如聚乙烯蜡或脂肪酸酯)在拌和温度下熔化释放液态组分,二者协同作用可实现拌和温度降低30~40°C。复合温拌剂的掺量需根据工程经验确定,通常表面活性剂掺量控制在0.5%左右,有机降粘剂掺量控制在1.5~2.5%,确保混合料在降低施工温度的同时,仍能满足路用性能要求^[1]。

3.1.2 集料质量控制

集料质量直接影响混合料骨架稳定性。粗集料应选用碱性岩石(如玄武岩或石灰岩),压碎值指标需控制在26%以内,针片状含量低于15%,以确保骨架嵌挤作用。细集料含泥量需严格控制在1%以内,砂当量指标不低于

60%,避免杂质削弱沥青粘附性。集料含水量是关键控制指标,需通过烘干设备将含水率降至0.5%以下,防止水分蒸发导致花白料或孔隙率超标。级配设计采用SMA-13或AC-16型骨架密实结构,4.75mm筛孔通过率控制在38~48%,2.36mm筛孔通过率控制在22~32%,形成连续级配以提升抗裂性能。

3.1.3 温拌剂掺量确定

温拌剂掺量需结合工程实践与材料特性综合确定。表面活性剂掺量通常为0.5%,此掺量下混合料可实现拌和温度降低30~35°C,同时动稳定度达到6000次/mm以上,满足重载交通需求。有机降粘剂掺量需根据其熔点调整,蜡类添加剂掺量控制在1.5~2.5%,确保拌和温度下完全熔化且不产生析出现象。掺量确定过程中需关注混合料工作性,确保沥青与集料均匀裹覆,避免出现离析或结块现象。

3.2 施工设备改进与应用适配

3.2.1 拌和楼改造

泡沫沥青法需在拌和楼加装高压水注入系统与发泡腔体,水压控制在2.5~3.5MPa,沥青温度维持在160~170°C以实现稳定发泡,膨胀比达10~15倍。有机降粘剂法需配置独立计量泵送系统,通过流量传感器精确控制添加剂投放量,误差不超过 $\pm 0.1\%$ 。拌和锅内部需增设搅拌桨叶,提升混合料均匀性,避免局部温拌剂浓度过高或过低。

3.2.2 燃烧器与烘干筒调整

燃烧器采用低氮氧化物旋流式设计,燃油雾化粒径控制在50~80 μm ,确保燃料充分燃烧,减少杂质生成。烘干筒内壁加装导流板,延长集料加热时间至40~45秒,使集料温度均匀性偏差小于5°C,避免因温度不均导致混合料性能波动。排气管增设除尘装置,粉尘排放浓度降至20mg/m³以下,满足环保要求。

3.2.3 运输车辆配置

自卸车车厢采用双层钢板结构,中间填充硅酸铝纤维棉,顶部覆盖防雨篷布与反射隔热膜,减少运输过程中温度散失。长隧道施工场景下,车辆配备车载加热系统,通过热油循环维持混合料温度不低于120°C,确保摊铺时混合料温度满足要求。运输时间超过1.5小时时,每30分钟启动加热装置5分钟,避免温度下降过快影响压实效果。

3.3 施工工艺控制与应用要点

3.3.1 拌和温度与时间

表面活性剂法拌和温度设定在140~150°C,较热拌沥青降低35°C,干拌时间延长至10秒,湿拌时间控制在

40-45秒,确保沥青与集料充分裹覆。有机降粘剂法根据蜡类熔点调整加热温度,拌和时间增加5秒以确保添加剂充分反应。出料温度需通过红外测温仪实时监测,偏差控制在 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内,避免温度过高导致沥青老化或温度过低影响施工操作性。

3.3.2 摊铺与碾压

桥梁施工采用非接触式平衡梁控制摊铺厚度,松铺系数较热拌沥青增加0.02-0.03,补偿温拌混合料压实过程中的体积收缩。初压阶段使用双钢轮压路机静压2遍,速度控制在2-3km/h,复压阶段切换振动模式,频率45Hz,振幅0.3-0.5mm,终压温度不低于 90°C 以消除轮迹^[4]。隧道施工需将钢轮压路机喷水量降至每分钟600-800ml,避免表面冷却过快导致压实度不足。边角部位采用小型振动压路机补压,碾压遍数增加至4-5遍,确保密实度达标。

3.3.3 通风管理

隧道内施工时,在摊铺机后方50米处设置轴流风机,风速不低于0.5m/s,配合射流风机形成纵向通风,及时排出沥青烟气。压路机作业区域增设局部排风装置,避免烟气积聚影响作业面能见度。作业面能见度需维持在30米以上,CO浓度控制在20ppm以下,保障施工人员健康与施工安全。

4 温拌沥青技术面临的挑战与未来应用发展方向

4.1 技术挑战

温拌沥青技术的规模化推广面临多重现实阻碍。成本结构失衡问题突出,高性能温拌剂如表面活性剂类材料受制备工艺复杂度影响,市场价格长期居高不下,导致混合料生产环节成本显著高于传统热拌体系,制约了工程经济性。长期路用性能验证存在空白领域,桥梁伸缩缝、隧道进出口等特殊构造物周边环境复杂,温拌混合料在温度剧变、动水冲刷等极端条件下的抗裂性能、水稳定性尚未形成完整评价体系,工程应用中存在质量隐患。标准化建设滞后于技术创新步伐,现行规范对温拌沥青混合料的设计方法、施工工艺参数及质量验收标准缺乏系统性规定,特别是针对桥梁隧道不同结构部位的差异化技术要求尚未明确,导致不同项目间施工控制水平参差不齐。

4.2 未来应用发展方向

材料创新方向聚焦于复合型温拌剂开发,通过将纳米材料、生物基降粘组分与传统温拌成分进行分子级复合,可实现降粘效率与成本控制的双重优化,同时提升混合料抗老化性能。智能化施工控制体系将深度融合物联网技术,在拌和、运输、摊铺、碾压全流程部署智能监测终端,结合边缘计算算法实时调整施工参数,有效解决桥梁大跨径段因日照辐射不均导致的温度离析问题,提升结构层均匀性^[5]。绿色低碳技术集成路径持续拓展,温拌工艺与厂拌热再生技术耦合可使旧料利用率大幅提升,配合橡胶粉改性可进一步优化材料性能,形成资源循环利用与节能减排的协同效应。特殊场景定制化开发向精细化演进,针对桥面铺装、隧道洞门、地下互通立交等不同构造特点,通过调整集料级配、沥青类型及温拌剂组分,开发出具有抗滑、降噪、抗剪切等特性的专用混合料,满足复杂交通环境下的功能需求。

结束语

温拌沥青技术通过降低施工温度、优化施工环境及提升路用性能,为桥梁隧道路面施工提供了高效解决方案。尽管面临成本、性能验证及标准化等挑战,但通过复合型温拌剂开发、智能化施工控制及绿色低碳技术集成等路径,技术经济性与适用性将持续提升。工程实践中需结合具体场景优化材料选择与工艺参数,强化全流程质量控制,以充分发挥温拌沥青技术在复杂工程场景中的技术优势,推动桥梁隧道路面施工向安全、环保、高效方向发展。

参考文献

- [1]张辉军.高速公路桥梁隧道路面施工中的温拌沥青技术与应用研究[J].建筑技术,2025,56(15):1879-1881.
- [2]王强.温拌沥青施工技术在高速公路工程中的应用[J].四川水泥,2024(7):237-239.
- [3]崔林.沥青路面施工技术在高速公路工程中的实践研究[J].运输经理世界,2024(13):10-12.
- [4]连世通.温拌沥青施工技术在高速公路路面工程中的运用[J].四川建材,2023(3):119-120.
- [5]夏天.温拌沥青施工技术在高速公路路面工程中的应用[J].运输经理世界,2024,(35):46-48.