

进行衬砌质量检测需结合多手段,以回弹法开展混凝土强度检测,每100米选取10个测区实施检测,强度推定值需达到设计强度的95%及以上;采用地质雷达开展衬砌厚度的测定,以50m为间隔检测1个断面,厚度合格比例需达到90%及以上,某隧洞检测后发现,K1+500处衬砌厚度仅42cm,立刻凿除后重新衬砌;实施裂缝检测采用人工检查衬砌表面法,裂缝宽度不超出0.2mm,深度以50mm为上限,若超出标准,则采用环氧树脂灌浆予以处理<sup>[9]</sup>。

#### 4.3.2 围岩稳定性长期评估

监测系统的布设应贯穿隧洞的整个生命周期,收敛监测的收敛测线在开挖面后方5m处布设,选用SWJ-7型收敛计,在开挖初期,按每天1次的频率监测,稳定后改为每周1次,倘若位移速率>5mm/d,即刻强化支护措施,为作好沉降监测,在洞顶地表安置沉降观测点,采用DS05型水准仪,精度达到每千米±0.3mm误差,于某隧洞施工当中,发现地表沉降速率达8mm/d,即刻把开挖方案变更为“短进尺、强支护”,开展应力监测工作,在围岩内部埋设振弦式应力计,对开挖阶段围岩应力重分布进行监测工作,为后期衬砌设计给予支撑依据。

以《水工隧洞设计规范》(SL279-2016)作为稳定性评估标准,围岩的收敛速度低于0.2mm/天,且累计收敛量未达到设计允许值;应力监测数据渐趋平稳,未呈现明显的应力集中现象;衬砌结构未现新增裂缝,也无裂缝扩展迹象显现。

### 4.4 质量控制难点与创新措施

#### 4.4.1 高水头隧洞防渗漏控制

就水头>100m的高压隧洞而言,采用“三阶段止水”方案:第一阶段进行初期支护止水:给喷射混凝土掺入防水剂,掺量是水泥用量的5%,针对明显渗漏水处,采取注浆封堵手段;②开展防水层的施工工作:铺搭厚度为1.5mm的EVA复合式防水板,所焊接的接缝宽度≥15cm,充气检测所采用的压力为0.25MPa,维持30分钟内压力下降幅度≤10%;③针对衬砌的止水安排:在施工缝与变形缝处嵌入宽度300mm的中埋式橡胶止水带,保证止水带以居中方式布置,固定的间距应≤50cm。

#### 4.4.2 复杂地质条件下的质量控制创新

当处于穿越膨胀性泥岩地层阶段,采用“前期加固+变形控制”技术:①开展超前预加固行动:开挖前3天,凭借超前管棚(规格Φ108mm,15m长度)灌注水泥-水玻璃双液浆(体积比1:浓度为35Be'的水玻璃,造就3m厚度的加固圈);②施工变形把控:运用U29型钢做成的可缩性钢拱架,预先留出20cm的变形空间,待围岩稳定局面形成后开展二次衬砌;③泥岩湿度把控:于洞内安置除湿机,把空气湿度调控至≤60%,规避泥岩遇水出现膨胀现象。

### 4.5 质量控制信息化管理

采用BIM跟物联网技术搭建智能监控平台,实现质量

把控数字化落地,生成隧洞施工BIM模型雏形,把开挖断面、支护参数等信息整合至模型内部,施工阶段实时将实际进度跟模型计划相比较,一旦偏差逾5%,采用布置压力传感器、位移计、振动仪等智能装备,实时把数据传送到云平台,造就质量控制动态曲线,给每根锚杆、每车混凝土贴上二维码标识,扫码可查看诸如施工时间、操作人员、检测结果这类信息,实现质量问题的可回溯性。

在关键工序布置智能传感体系。例如,在爆破地带安置微震传感器,即刻采集振动波形数据,自动生成振速图表,就自动对爆破电源进行切断;在锚杆安装地点嵌入RFID芯片,把注浆压力、抗拔力试验等相关数据关联起来,扫码即可对全流程信息进行追溯;在衬砌模板周边布置应力感应器件,实时探查混凝土浇筑过程里压力的变化情形,防止因浇筑速度过快造成模板形变。

平台还可以加入质量验收模块,自动把三维激光扫描的断面数据以及混凝土试块强度报告等引入系统,产出可直观化的质量评估报告书,标识超控超出规定段、强度未达标的区域等问题点处,且自动把责任单位和整改期限关联起来,依靠大数据分析本领,解析历史数据内的质量风险规律,就如某段地质环境下的最优爆破参数、支护延误和塌方概率的关联曲线等实例,为后续施工过程提供决策指引,达成从“事后核对”到“过程告警”“事前预防”的转变。

## 5 结论

水利工程隧洞开挖施工技术与质量控制是一项系统性工程,需结合地质条件、功能需求选择适宜的开挖工艺,并从勘察、设计、施工到验收构建全流程质量控制体系。未来,随着智能化技术的发展,隧洞开挖将向精准化、绿色化方向迈进,引入BIM技术实现开挖过程三维模拟,结合物联网传感器实时监测爆破振动、围岩应力,提升施工精度。研发智能TBM远程操控系统,实现开挖、支护全流程自动化,适用于高风险地质条件,为水利工程安全运行提供更强保障。

### 参考文献

- [1] 吴曙辉.水利工程隧洞开挖施工探析[J].东北水利水电,2024,42(01):26-28.DOI:10.14124/j.cnki.dbsl22-1097.2024.01.017.
- [2] 胡其林,张萍,罗臣.水利工程大断面输水隧洞机械化钻爆工艺应用[J].四川水利,2023,44(05):108-111.
- [3] 晏明.水利工程小断面隧洞开挖与支护施工研究[J].中国高新科技,2023,(16):145-146+149.DOI:10.13535/j.cnki.10-1507/n.2023.16.48.
- [4] 何巧清.引水隧洞的支护方法与施工技术[J].珠江水运,2023,(14):42-44.DOI:10.14125/j.cnki.zjssy.2023.14.011.
- [5] 李建俊.水利工程隧洞开挖技术施工工艺[J].水上安全,2023,(02):190-192.

# Analysis of Strategies for Improving the Structural Performance of Asphalt Pavement in Municipal Road Engineering

Liang Zhao

Shanxi Sanjian Group Co., Ltd., Changzhi, Shanxi, 046000, China

## Abstract

The structural performance of asphalt pavement in municipal road engineering is directly related to the durability, safety and comfort of the road. With the continuous increase in traffic load and the increasingly complex climatic conditions, traditional structural design and material processing techniques have become difficult to fully meet the requirements of modern municipal roads for pavement performance. Through systematic analysis of the combination methods of structural layers, material performance improvement technologies, and construction quality control measures, exploring multi-dimensional optimization strategies can help enhance the anti-deformation capacity and fatigue life of asphalt pavements, reduce the occurrence of structural diseases such as cracks and ruts, and extend the service life of roads. This paper analyzes the influence mechanism of structural performance, the optimization path of design and materials, the control means of construction technology, and the performance detection and maintenance strategies, providing systematic technical support and theoretical reference for the improvement of the structural performance of asphalt pavement in municipal road construction.

## Keywords

Asphalt pavement Structural performance; Material modification Construction control Maintenance strategy

## 市政道路工程中沥青路面结构性能提升策略分析

赵亮

山西三建集团有限公司, 中国 · 山西 长治 046000

## 摘要

市政道路工程中沥青路面的结构性能直接关系到道路的耐久性、安全性与使用舒适性。随着交通负荷不断增加以及气候条件趋于复杂,传统结构设计与材料工艺已难以全面满足现代市政道路对路面性能的要求。通过对结构层组合方式、材料性能提升技术以及施工质量控制手段的系统分析,探索多维度优化策略,有助于增强沥青路面的抗变形能力与疲劳寿命,减少裂缝、车辙等结构性病害的发生,延长道路服役年限。本文围绕结构性能影响机制、设计与材料优化路径、施工工艺控制手段及性能检测与养护策略展开分析,为市政道路建设中沥青路面的结构性能提升提供系统性技术支撑与理论参考。

## 关键词

沥青路面; 结构性能; 材料改性; 施工控制; 养护策略

## 1 引言

市政道路作为城市交通系统的重要组成部分,其路面结构性能直接关系到道路运行的质量与社会运行效率。沥青路面以其良好的行驶舒适性和施工便捷性,在市政道路建设中广泛应用。然而,在高频次交通荷载和极端气候条件共同作用下,传统沥青路面结构易出现疲劳开裂、沉陷与早期损坏等问题,严重制约道路寿命与服务水平。当前工程实践中普遍存在设计与施工环节脱节、材料性能匹配不足、后期养护不科学等问题,亟需从结构层次进行系统性技术优化。本文围绕沥青路面结构性能的提升路径进行深入研究,提出

具备适应性与可实施性的策略,助力市政道路工程高质量发展。

## 2 沥青路面结构性能的关键影响因素

### 2.1 交通荷载与结构响应的关联性分析

市政道路中长期承载复杂交通荷载,结构层在反复荷载作用下产生累积疲劳应力,导致早期破坏。车辆运行过程中产生的竖向力和侧向剪力,经过沥青路面各结构层传递与分解,形成不同形式的应力集中区,影响结构耐久性与稳定性。若结构设计未充分考虑实际交通荷载等级、行车轨迹变化与动态荷载频率,极易造成上层破坏扩展至下层,引发纵向裂缝、车辙沉陷与层间滑移等问题。提高结构层对交通荷载的适应能力,应从材料性能匹配、层间粘结质量与荷载扩散路径优化等方面入手,构建抗疲劳性能良好的结构系统,

【作者简介】赵亮(1988-),中国山西高平人,本科,工程师,从事市政道路与交通工程研究。

以实现路面长期稳定运行。

## 2.2 气候条件对材料性能变化的影响

沥青材料的黏弹性特征对气候条件变化极为敏感，温度、湿度和日照等因素会直接影响其力学性能。高温条件下沥青软化，剪切强度下降，导致车辙变形加剧；低温环境中沥青变脆，抗拉强度减弱，易出现反射裂缝与缩裂。湿度升高引发路面结构中水分渗透，削弱骨料间黏结力，产生水损破坏。尤其在降雨频繁和冻融交替的地区，材料孔隙率与吸水率控制不当将显著缩短路面寿命。根据区域气候特征调整材料配方，引入高温稳定性与低温抗裂性良好的改性沥青，同时加强排水系统设计与层间防水处理，有助于应对恶劣气候对路面结构性能的侵蚀影响。

## 3 结构设计优化对性能提升的支撑路径

### 3.1 分层设计理念下的结构组合形式优化

沥青路面结构分层设计基于不同材料力学特性进行功能划分，强调结构层次间的力学协同与应力传递合理性。高模量面层提高表层抗剪能力，中模量基层扩散荷载、缓解疲劳应力，低模量底基层提供弹性支撑与沉降控制。结构组合形式的优化应考虑荷载作用路径、材料强度匹配与变形协调机制，以避免因刚度突变或界面不良引发结构病害。双层或多层复合设计可提升结构整体性与稳定性，尤其在高荷载道路中表现出更强的抗疲劳性能。结构优化应结合实际交通需求、环境特征与施工能力，通过力学模拟与性能评价方法，确定最优的材料组合与层次厚度配置方案，保障结构功能充分发挥。

### 3.2 不同厚度对比对路面疲劳寿命的调控

沥青路面各结构层厚度直接影响结构受力模式与疲劳寿命。面层厚度不足会导致应力集中于表层，裂缝易向下扩展，形成疲劳破坏；过厚则易产生内部温度梯度不均，降低整体黏结质量，造成剥离。基层与底基层厚度过小将削弱支撑刚度，增加上层结构变形幅度，降低疲劳抗力。合理的厚度配比需综合交通荷载等级、地基强度与材料模量，通过多层弹性理论与疲劳性能计算模型进行优化设计。厚度设计需避免结构刚度突变，确保各层应力分布连续性，并提高结构整体变形协调能力。根据实际工程条件对不同组合厚度方案进行寿命预测与损伤累积评估，是提高路面结构耐久性的关键路径。

## 4 沥青材料改性技术的应用方向

### 4.1 高模量沥青混合料的力学性能优势分析

高模量沥青混合料在市政道路中广泛应用，其优越的结构强度与抗变形能力为路面性能提升提供了重要支撑。通过引入高强度骨料、改性剂与抗老化添加剂，显著提升沥青混合料的弹性模量与抗剪强度，在高温条件下依然保持较低的永久变形率。高模量材料能够有效分散交通荷载，降低结构应力集中，延缓疲劳裂缝发展进程，适用于交通密度大、

荷载频繁的城市主干道工程。该类材料在施工过程中要求严格温度控制与压实质量管理，以确保其密实性与力学性能的最大化。在设计中合理搭配高模量混合料与其他层次材料，有助于形成性能均衡、协同工作的结构系统，全面提升沥青路面的使用寿命与服务品质。

### 4.2 温拌技术在市政道路低碳化建设中的适配性

温拌沥青技术通过降低拌合和摊铺温度，在保持混合料工作性能的前提下实现节能减排与施工便捷化。相比热拌技术，温拌工艺可减少燃料消耗 20% 以上，减少二氧化碳排放 30% 左右，有助于城市道路建设绿色转型。该技术降低了施工温度对环境与作业人员的影响，延长了施工时间窗口，提高施工适应性，特别适合夜间作业或气温偏低环境。温拌沥青的力学性能与结构稳定性通过改性添加剂增强，具备良好的初期强度与长期耐久性。在市政道路推广中需结合区域气候、交通条件与设备能力进行技术参数调控，优化材料组分和工艺流程，确保其在性能、环保与经济效益上的全面适配性。

### 4.3 复合改性沥青对高温抗车辙性能的增强作用

复合改性沥青通过引入多种高分子改性剂，如 SBS、橡胶粉与纳米填料，显著提升沥青材料的高温稳定性与结构粘聚力，有效抵御车辙与流动变形问题。高温环境下，传统沥青易出现塑性流动导致路面车辙累积，而复合改性剂可提高材料的黏弹性性能与剪切强度，延缓结构疲劳破坏。复合改性沥青在重载交通与连续高温地区应用表现出更优的抗车辙能力与延展性，适用于城市快速路与公交专用道等高需求场景。其施工适应性好，可在传统施工设备条件下实现推广，但需严格控制掺量比例与拌合温度。通过材料性能试验与现场验证相结合，指导复合改性沥青在市政道路结构中的合理应用，可全面提升结构在高温条件下的稳定性能与安全性。

## 5 施工工艺控制对结构性能的保障作用

### 5.1 摊铺压实工艺参数对结构密实度的影响

沥青混合料摊铺与压实工艺直接决定结构层的密实度水平，进而影响其力学性能与耐久性。摊铺温度、速度与厚度控制不当将导致混合料冷却过快、骨料离析或表面不平整，使压实效果下降，形成空隙率超标区域，降低抗水损与抗剪强度。压实工艺中碾压温度窗口、碾压遍数与碾压模式需与混合料特性相匹配，以确保材料在可塑状态下实现粒料间的最佳排列与粘结。密实度不足将引发结构层早期开裂、剥离与水渗透，进而影响结构整体寿命。通过严格工艺参数控制、实时温度监测与压实度检测，可以提升施工质量的一致性与可控性，为沥青路面结构性能提供稳定的基础保障。

### 5.2 温控管理对接缝稳定性和整体性的提升价值

温控管理在沥青路面施工中具有重要作用，尤其在接缝处理环节对结构整体性影响显著。摊铺过程中温度梯度的