

高速公路沥青路面耐久性提升关键技术探讨

魏明霞

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 650000

摘要: 随着我国高速公路网络的持续扩展与交通荷载的日益加重, 沥青路面作为最主要的铺面形式, 其服役性能和使用寿命面临严峻挑战。早期损坏现象频发, 不仅影响行车安全与舒适性, 也大幅增加了养护成本, 制约了交通基础设施的可持续发展。本文聚焦于提升高速公路沥青路面耐久性的关键技术路径, 系统梳理了当前沥青路面常见的病害类型及其成因, 并从材料设计、结构优化、施工控制及智能养护四个维度深入探讨了耐久性提升的核心技术体系。重点分析了高性能改性沥青、骨架密实型级配设计、温拌与再生技术、精细化施工工艺以及基于性能的路面设计方法等前沿进展。研究表明, 通过多尺度材料协同设计、全寿命周期性能导向的结构优化、智能化施工质量控制与预防性养护策略的深度融合, 可显著提升沥青路面的抗疲劳、抗车辙、抗水损害及抗老化能力, 延长其使用寿命。最后, 本文对沥青路面耐久性研究的未来发展方向进行了展望, 旨在为我国高速公路建设与养护提供理论支撑与技术参考。

关键词: 高速公路; 沥青路面; 耐久性; 改性沥青; 骨架密实结构; 温拌再生; 智能施工

引言

高速公路是国家综合立体交通网的骨干, 其通行效率与服务水平直接关系到区域经济发展与社会民生。沥青路面因其行车舒适、噪声低、维修便捷等优点, 在我国高速公路中占比超过90%。然而, 在重载交通、极端气候(高温、低温、强紫外线)及复杂环境因素的综合作用下, 许多高速公路沥青路面在设计使用年限内便出现了诸如车辙、裂缝、坑槽、松散、泛油等早期病害, 严重影响了道路的服务功能与结构安全。传统沥青路面设计理念多侧重于满足短期强度与刚度要求, 对长期性能衰减规律及多因素耦合作用下的损伤演化机理关注不足, 导致“建得快、坏得早”的现象普遍存在。因此, 如何系统性地提升沥青路面的耐久性, 实现“长寿命、低维护”的目标, 已成为当前道路工程领域的核心课题^[1]。耐久性是指路面结构在预期服役期内, 在各种交通荷载与环境作用下, 维持其功能性能不发生不可接受退化的能力。提升耐久性并非单一技术的突破, 而是一项涵盖材料科学、结构力学、施工工艺与养护管理的系统工程。本文旨在全面梳理并深入探讨提升高速公路沥青路面耐久性的关键技术, 以为构建高性能、长寿命的现代沥青路面提供科学依据与实践指导。

1 高速公路沥青路面主要病害及成因分析

准确识别病害类型及其根本成因, 是制定有效耐久性提升策略的前提。高速公路沥青路面的主要病害可归纳如下:

1.1 车辙 (Rutting)

车辙是沥青路面在高温和重载反复作用下产生的永

久塑性变形, 表现为轮迹带处的纵向凹陷。其成因主要包括: (1) 材料因素: 沥青结合料高温稳定性不足, 混合料骨架结构松散, 矿料级配不合理(如细料过多)。(2) 结构因素: 基层或路基承载力不足, 在重载下产生过大变形并向上传递。(3) 交通与气候因素: 渠化交通、超载车辆以及持续高温天气加剧了车辙的形成。

1.2 裂缝 (Cracking)

裂缝是沥青路面最常见的病害, 主要包括: (1) 疲劳裂缝: 由行车荷载反复作用引起, 始于路面底部, 向上扩展。成因在于沥青老化导致材料变脆, 以及结构层厚度不足或基层开裂。(2) 温度裂缝: 包括低温收缩裂缝和温度疲劳裂缝。低温下沥青混合料收缩应力超过其抗拉强度时即产生开裂。(3) 反射裂缝: 半刚性基层(如水泥稳定碎石)因干缩或温缩开裂后, 裂缝向上反射至沥青面层。

1.3 水损害 (Moisture Damage)

水损害指水分侵入路面结构内部, 在动水压力作用下导致沥青膜剥离、集料松散, 最终形成坑槽、松散等病害^[2]。其关键成因是沥青与集料的粘附性不足, 以及路面空隙率过大或排水系统不畅。

1.4 老化 (Aging)

沥青在热、氧、光、水等因素作用下会发生不可逆的化学变化, 表现为硬化、脆化, 导致混合料柔韧性下降、抗裂性能减弱。施工过程中的短期老化与服役期间的长期老化共同决定了路面的最终寿命。

2 提升沥青路面耐久性的关键技术体系

针对上述病害成因, 提升耐久性需构建一个覆盖

“材料-结构-施工-养护”全链条的技术体系。

2.1 高性能沥青结合料技术

沥青结合料作为混合料的连续相，其流变性、粘附性与抗老化能力直接决定路面抵抗车辙、开裂及水损害的性能。传统基质沥青高温易软化、低温易脆裂，且在氧、热、紫外线作用下加速硬化，难以满足现代高速公路耐久需求。因此，发展高性能改性沥青成为关键。苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物（SBS）改性沥青因其显著提升弹性恢复、高温稳定性与低温延展性，已成为重载道路面层首选。SBS在沥青中溶胀形成三维网络，有效抑制高温流动，大幅提高复数模量与车辙因子（ $G^*/\sin\delta$ ）。星型SBS可将PG高温等级提至82℃以上，适用于南方高温区；线型SBS则在-20℃以下仍具良好延性，适合寒冷地区。但改性效果高度依赖工艺：发育温度应控制在170~180℃，剪切速率 $\geq 3000\text{rpm}$ ，持续30~60分钟，否则易导致储存离析（软化点差 $> 2.5^\circ\text{C}$ ），引发施工不均与早期损坏。为应对多重性能需求，复合改性日益普及。例如，SBS与胶粉（CRM）协同使用，可提升高温性能、降噪与抗滑性，但需采用湿法工艺制备胶粉改性沥青以避免干法离析。针对水损害，常掺入0.3%~0.5%胺类或硅烷偶联剂类抗剥落剂，使冻融劈裂强度比（TSR）由不足70%提升至90%以上。为延缓老化，可引入受阻酚与亚磷酸酯复合抗氧化体系，使RTFOT后延度保留率提高20%以上。此外，生物基材料（如木质素、植物油衍生物）作为绿色替代选项，虽高温性能有限，但与SBS复配可在环保与性能间取得平衡，代表可持续发展方向。

2.2 沥青混合料设计的精细化与性能导向

沥青混合料是路面直接承载体，其骨架稳定性与胶浆密实度共同决定力学性能与耐久性。传统悬浮密实结构易压密产生车辙，而开放结构则易水损老化。现代设计强调“骨架密实”原则——粗集料形成嵌挤骨架，沥青胶浆充分填充空隙。石料玛蹄脂沥青混合料（SMA）是典型代表：粗集料（ $> 4.75\text{mm}$ ）占比 $\geq 70\%$ ，沥青用量6.0%~6.8%，并掺0.3%~0.4%木质素纤维，既防高温析漏，又抑低温裂缝^[3]。设计需控制谢伦堡析漏 $\leq 0.1\%$ 、肯塔堡飞散 $< 12\%$ 、60℃动稳定度 $\geq 6000\text{次/mm}$ 。Superpave体系则基于气候与交通荷载（ESALs）选择PG等级沥青，并通过控制点与禁区规避不良级配。例如，高温重载路段宜用PG76-22或PG82-22改性沥青，避免细料富集。空隙率是连接材料与环境的关键参数：过高（ $> 6\%$ ）加速水氧侵入，过低（ $< 2\%$ ）易泛油。AC类目标空隙率为4.0%±0.5%，SMA为3.0%±0.5%，连通空隙应 $<$

1%。施工均匀性至关重要：摊铺温差 $> 15^\circ\text{C}$ 易致压实不足。工程中常采用转运车（MTV）消除骨料离析，智能摊铺机调节布料器转速，并借助无核密度仪实时监测，将压实度变异系数控制在2%以内，确保结构均质密实。

2.3 温拌与再生技术的工程化实施

在全球“双碳”背景下，温拌沥青（WMA）与再生技术兼具环保效益与耐久优势。传统热拌（150~170℃）能耗高且加剧沥青短期老化，而WMA通过降低黏度使拌和压实温度下降20~40℃，有效缓解老化。主流WMA技术包括：有机添加剂（如Sasobit，掺量2%~3%，拌和温度130~140℃）、化学发泡剂（如Evothorm）及物理发泡法。研究表明，合理应用WMA可使短期老化程度降低15%~25%，提升初始性能储备。沥青路面再生技术亦是资源循环与耐久提升的重要路径。厂拌热再生（HIRA）将回收料（RAP）破碎筛分后，按比例掺入新料与再生剂。芳香油类再生剂（如AR-1000）可补充轻质组分，恢复流变性能。工程中需对不同粒径RAP测定沥青含量与PG等级，采用“性能平衡法”确定配比，确保再生混合料PG等级达标。实践表明，在RAP掺量30%~50%、再生剂占旧沥青8%~12%、工艺可控前提下，再生料动稳定度、TSR等指标均可满足规范，实现经济性与耐久性双赢。

2.4 精细化与智能化施工控制体系

“三分材料，七分施工”凸显施工对耐久性的决定性作用。现代工程正从经验驱动转向数据驱动，智能化施工成为关键支撑。拌和阶段需严格控制：沥青计量误差 $\leq \pm 0.25\%$ ，集料含水率通过红外/微波传感器实时反馈，动态调整烘干参数。SMA混合料干拌 $\geq 10\text{秒}$ 、湿拌 $\geq 45\text{秒}$ ，确保纤维分散均匀。摊铺采用3D找平系统（GNSS+激光），平整度标准差 $\leq 1.2\text{mm}$ 。压实是决定空隙率的核心环节：智能压实（IC）技术通过加速度传感器生成全场压实热力图，指导补压^[4]。SBS改性料初压温度 $\geq 145^\circ\text{C}$ ，终压 $\geq 90^\circ\text{C}$ ，碾压速度2~4km/h，重叠宽度 $\geq 20\text{cm}$ 。接缝处理亦需精细：纵向冷接缝切割后涂改性乳化沥青再覆盖热料；横向接缝做成斜向阶梯状，压实度 $\geq 93\%$ ，避免成为病害起点。

2.5 基于性能的结构设计与预防性养护策略

耐久性最终体现为全寿命周期性能维持。传统“坏了再修”模式成本高、扰民，而长寿命设计理念与预防性养护是从源头延长寿命的根本路径。长寿命沥青路面（Perpetual Pavement）采用功能分层结构：4cm SMA-13表层提供抗滑抗车辙；6cm高模量沥青混凝土（EME，15℃动态模量 $\geq 14000\text{MPa}$ ）中层控制基层拉应变 < 100

微应变（远低于疲劳极限）；底基层采用LSPM或ATB-30，兼具排水与抗反射裂缝功能。该“强基薄面”结构可确保50年以上仅表层需修复。即便最优结构，表面功能仍会衰减，故预防性养护不可或缺。其核心是“早干预、低成本、高效益”——在通车3~5年、PCI > 85时主动干预。技术选择需匹配病害：雾封层（0.2~0.4L/m²）封闭微孔；超薄罩面（Novachip，1.5~2.0cm）恢复抗滑；微表处（MS-3，8~10mm）应对中度老化。结合大数据与机器学习模型，可精准识别最佳养护时机。实践证明，科学预防性养护可延长寿命5~8年，投资效益比达1:4~1:10，是实现高耐久性的关键一环。

3 工程应用案例与效果分析

以某地区重载高速公路改扩建工程为例，该项目所处环境极为严苛，高温多雨且重载交通比例高，对路面质量与耐久性提出了极高要求。为应对挑战，项目采用了综合技术方案。在面层施工上，选用SBS改性沥青SMA-13，并掺加抗剥落剂和抗老化剂，增强路面的抗剥落与抗老化能力；中下面层则采用高性能70#基质沥青AC-20/AC-25，同时严格控制空隙率，保证路面结构的稳定性。施工环节全面应用温拌技术（Evotherm）和智能压实系统，温拌技术降低了施工温度，减少能源消耗与有害气体排放，智能压实系统则确保了压实质量均匀性。通车3年后，及时实施雾封层预防性养护，有效延缓路面老化。通车运营5年后的跟踪检测结果显示，该路段车辙深度平均小于3mm，无明显裂缝和水损害迹象，路面状况指数（PCI）保持在95以上，与同期修建的传统路段相比，优势显著。这一案例充分验证了所采用的综合

技术体系在应对复杂环境、提升路面性能与耐久性方面的有效性，为类似工程提供了宝贵经验与借鉴。

4 结语

提升高速公路沥青路面的耐久性是一项复杂的系统工程，需要从材料、结构、施工到养护的全链条协同创新。本文研究表明：高性能改性沥青和优化的混合料设计（如SMA、骨架密实结构）是抵抗各类病害的根本。精细化、智能化的施工控制是确保设计意图得以完美实现的保障。基于全寿命周期成本和性能导向的设计与养护理念，是实现长寿命、低维护目标的核心。未来，沥青路面耐久性研究将呈现以下发展趋势：一是智能化与数字化：BIM、数字孪生、物联网（IoT）技术将深度融入路面的设计、建造与运维全过程，实现全生命周期的智能管理。二是多功能一体化：开发兼具自感知、自诊断、自修复甚至能量收集功能的智能路面材料。三是绿色低碳深化：更高比例的RAP应用、生物基沥青、碳捕获技术等将进一步推动路面工程的可持续发展。

参考文献

- [1]万志青,熊萍花.高速公路沥青路面耐久性及早期损坏分析[J].运输经理世界,2021,(10):102-104.
- [2]梁伟民.公路工程耐久性沥青路面施工关键技术[J].交通世界,2022,(28):79-81.
- [3]张朝政,马翠明,田辉.重交通高性能沥青路面材料服役期耐久性与性能优化[J].建筑技术开发,2025,52(10):152-154.
- [4]徐鸥明,金林通,郭嘉,等.沥青路面抗滑耐久性研究与发展[J].公路,2024,69(03):6-14.