

城市道路老路改造中的典型病害成因分析及结构层优化设计研究

文 / 苏方瑶 中堃工程设计有限公司龙湾分公司

孔丽晴 中堃工程设计有限公司龙湾分公司

摘要：城市道路作为城市交通系统的重要组成部分，其老路改造工程对于保障交通畅通和延长道路使用寿命具有关键作用。随着城市化进程加快，中国诸多城市道路面临长期服役后的结构老化和病害积累，传统改造方法难以满足现代交通需求。本文结合城市道路老路改造的实际，系统分析典型病害的产生机制，探讨针对病害成因的设计策略，随后研究结构层优化设计方案，以提升改造道路的耐久性与功能性能。

关键词：城市道路；老路改造；典型病害；成因分析；设计要点；结构层优化设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.064

引言

我国城市道路建设历经数十年发展，许多早期铺装道路已进入维护和改造阶段。随着交通负荷持续增长，老旧路面出现裂缝、沉陷、车辙等多种病害，影响行车安全与舒适度。老路改造不仅需解决表面病害，更应关注结构层的整体性能退化，防止病害反复发生。当前改造设计中，如何结合道路实际服役状况，科学分析病害成因，合理调整结构层设计参数，已成为提升改造效果的关键。本文围绕典型病害机制，深入探讨针对性设计措施及结构层优化，以满足未来使用需求，推动城市道路老路改造技术进步。

一、城市道路老路改造中的典型病害成因分析

中国城市道路老路改造过程中，常见的病害主要包括疲劳裂缝、沉陷变形、车辙和坑槽等。疲劳裂缝的形成通常源于结构层多次承受重复荷载作用，尤其是基层和底基层材料强度及刚度退化后，面层在循环荷载下产生微裂纹，逐渐发展为贯穿性裂缝。沉陷变形多由于路基软弱、基层压实不足及地下水位波动引起^[1]。特别是在软土地基区域，施工时换填不充分或加固措施不到位，导致结构层受力不均匀，路基出现局部沉降，形成表面不平整。车辙是老路常见的塑性变形病害，主要因路面承载超出设计标准及沥青混合料高温下黏度下降而产生。坑槽形成多与排水系统不完善及基层材料受水软化密切相关。道路积水渗入基层，导致基层强度下降，局部路面承载力不足，产生坑洞。加之施工时基层厚度不足或压实度不达标，进一步加重坑槽扩展。此外，冻融循环在北方地区也导致基层材料反复膨胀收缩，促进坑槽病害的发展。

二、城市道路老路改造中的设计要点

（一）优化结构层材料选用与配比设计

针对城市道路老路疲劳裂缝频发的现状，结构层材料的选用与配比设计必须严格结合材料力学性能与施工工艺要求，确保整体结构层具备良好的抗疲劳能力及力学稳定性。基层优先选用改性稳定土或掺入石灰、粉煤灰的稳定土复合材料，通过控制掺合料比例，实现基层土体强度和模量的显著提升。该类材料需严格控制含水率于设计最优含水量 $\pm 2\%$ 的范围内，避免过湿导致结构

强度及模量下降。面层沥青混合料宜采用聚合物改性沥青材料，辅以橡胶粉或纤维材料增强其高温稳定性及弹性恢复性能^[2]。设计配合比时，采用马歇尔稳定度、空隙率及动态模量等试验指标，结合实验室反复拌合、养护模拟确定最佳含油量及压实参数，确保密实度达97%以上，减少路面孔隙率，抑制微裂纹发展。骨料级配应优化至密实骨架结构，提升混合料内部的承载力与应力传递效率。针对不同气候区应调整材料组成及厚度，强化材料抗热胀冷缩性能，延缓结构疲劳裂缝的萌发与扩展。

（二）加强路基处理与加固设计

路基软弱及承载力不足为沉陷变形的根本诱因，必须开展系统性地质勘查，获取详尽土质参数、地下水位及其动态变化信息。软土地基处理宜采用换填法，选择颗粒级配合理、排水性能优异的碎石或砂砾作为换填材料，保证换填层厚度不低于1.5米，充分满足结构承载要求。对于极软弱土层，推荐结合深层搅拌技术，将水泥、水玻璃等固化剂均匀掺入土体形成复合地基，显著提升地基整体刚度与稳定性。高地下水位区应配套布置完善的排水系统，包括水平排水管网与排水井，确保地下水位稳定，防止水饱和引起土体承载力剧降。针对填筑施工组织设计上应分层进行，单层厚度控制于20-30厘米，采用多遍振动压路机碾压，确保路基密实度达到规范要求的95%以上。同时，针对路基可能存在的裂缝或潜在滑动面，应采取针对性设计加固措施。例如，采用土工格栅或土工织物进行加筋处理，增强路基的抗剪强度和整体性，减少裂缝扩展的风险。对于存在滑动倾向的路段，可设置抗滑桩或挡土墙等支挡结构，有效约束路基的侧向位移，保证道路结构的稳定性^[3]。

（三）完善排水系统设计及施工控制

坑槽病害的形成多由排水不畅引发基层受水软化，设计排水系统时必须充分保障路面及路基的高效排水能力。路面纵横坡设计应遵循横坡1.5%~2.5%的范围，配合合理的纵坡，促进雨水快速流走，避免积水停滞。基层排水层采用级配合理、透水性能良好的碎石，厚度匹配设计排水需求，设置盲沟及截水沟，引导地表水及雨水远离基层结构。排水管网设计需综合考虑区域水文

条件及极端降雨强度，合理确定管径及布置密度，保障排水通畅。施工阶段严格落实防渗设计措施，铺设连续且无裂缝的沥青防水层，密封接口，防止水分渗入基层。管线保护尤为关键，施工前应详细测绘并标识排水管网，避免机械损伤，施工后建立定期维护及检测机制，清除堵塞，保障排水系统长期功能有效，减少因积水导致基层强度削弱和坑槽形成的风险。

(四) 综合考虑气候与环境因素的设计适应性

针对气候差异，路面结构设计需充分结合区域温湿度特征及冻融循环规律，进行材料和结构参数的差异化优化，流程见下图1。南方高温湿润区，选用高温稳定

性良好的聚合物改性沥青，采用密实型沥青混合料设计，提高面层密度并配合纤维或加筋材料，增强抗车辙性能。面层厚度适度增加，提升高温下的稳定性和变形抵抗。北方寒冷区，设计时应设防冻层及隔离层，采用粒径合理的防冻土及保温材料，防止冻胀现象向基层传递^[4]。冻融期排水系统应具备良好排水性能，选用耐低温性能优异的排水管材，并合理布置排水口，保证冻融期积水及时排出。此外，针对风沙大、盐渍化严重的西部地区，路面结构设计需增强抗风蚀、抗盐蚀能力。可选用抗风沙侵蚀的耐磨材料，以及具备耐盐腐蚀性能的特种混凝土，提高路面的耐久性和稳定性。

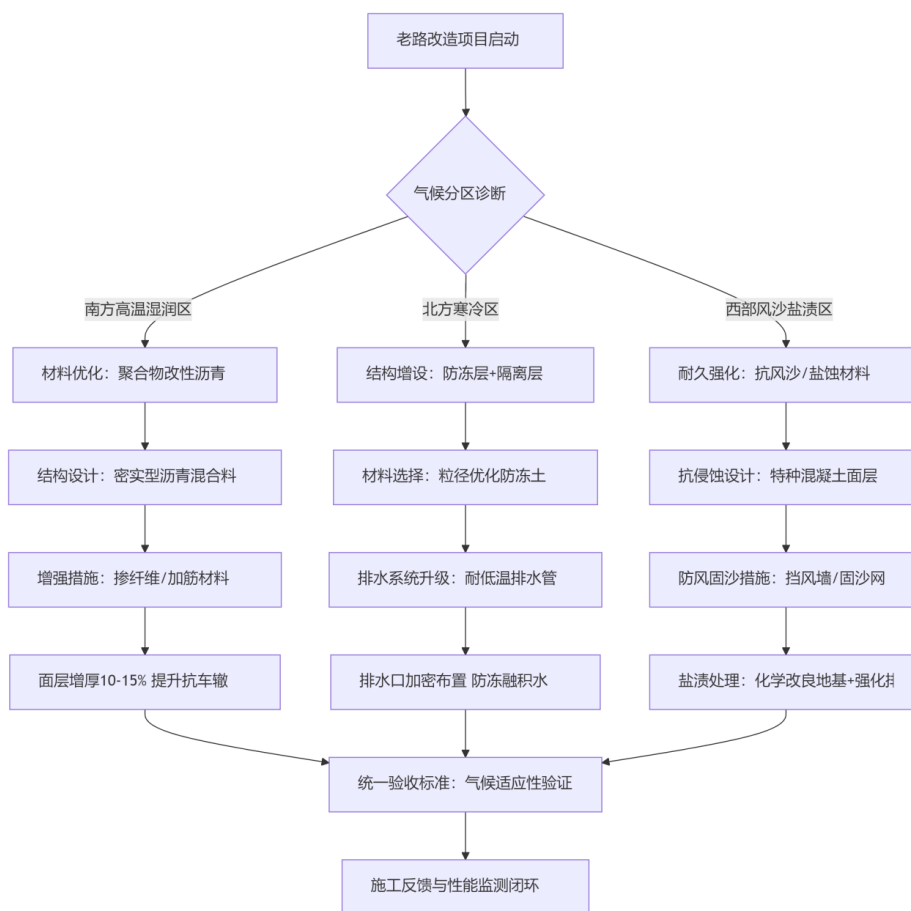


图1 综合考虑气候与环境因素的设计适应性流程

三、城市道路老路改造中结构层优化设计

(一) 多层复合结构设计提升整体承载性能

在城市道路老路改造中，针对基层承载能力下降及应力集中引发的结构破坏问题，采用多层复合结构设计可有效分散并调节路面应力，如下图2所示。具体实施时，先在原有基层基础上增设改性底基层和稳定中基层，形成梯度递减的力学性能分布。改性底基层宜采用石灰粉煤灰土或水泥粉煤灰稳定土，此类材料通过水化反应显著提高基层模量和抗压强度，改善路基承载性和抗变形能力。稳定中基层应选用级配合理的碎石材料，通过调节粒径级配和密实度提升弹性模量，降低传递至路基的应力幅值。设计过程中应综合考虑现场路基模量、交通荷载特征及环境湿度等因素，结合室内试验与现场回弹模量检测，确定各层厚度及材料配比^[5]。

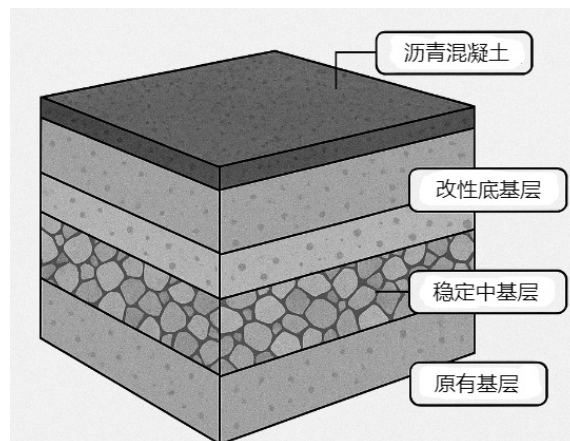


图2 多层复合结构

（二）采用高性能改性材料提高结构耐久性

为缓解沥青层因温度变化及交通荷载导致的裂缝扩展与材料性能退化，应在结构层设计中引入高性能改性材料以增强材料的弹性恢复力及疲劳抗裂性能。具体措施包括在面层沥青混合料中掺入 SBS（苯乙烯-丁二烯-苯乙烯）共聚物、PE（聚乙烯）或橡胶粉等改性剂，这些改性材料通过改善沥青的弹塑性和黏弹性能，提升其低温柔性和高温稳定性，减缓热胀冷缩引起的裂缝产生。基层材料方面，采用粉煤灰、矿渣等矿物掺合料替代部分水泥，优化混合料颗粒级配及结构孔隙，提升基层密实度与抗压强度。设计时应依据交通等级及气候环境参数，通过实验室性能测试确定改性剂用量及掺配方案，确保混合料在不同温度和荷载条件下性能稳定。施工阶段，强调改性材料均匀掺拌，严格控制搅拌温度和时间，保证改性剂充分分散。混合料摊铺后应及时压实，控制摊铺温度与压实工艺，防止材料分离或未密实。此类高性能改性材料的系统应用能有效抑制温度裂缝扩展及疲劳裂纹产生。

（三）结构层厚度优化设计以适应实际荷载分布

针对城市老路交通流量不断增长及荷载特性多样化的实际情况，结构层厚度设计需基于详细工况数据展开动态优化，避免传统厚度设计带来的材料浪费及结构性性能不足。设计流程首先采集现场路基弹性模量、土壤承载力以及车轴荷载分布数据，通过现场载荷板试验和路基反射波速检测获得精准材料力学参数。结合交通流量统计及车轴重量分布频次，利用有限元法建立路面结构三维模型，模拟不同厚度组合下的应力-应变响应。针对重载密集区域，如主干道和公交线路，可适当增加基层和面层厚度，以降低结构层内部的拉应力和剪切应力峰值。对交通流量较低的次干路或支路，则可通过厚度适当减薄实现经济性优化。设计时需兼顾施工可行性，避免厚度过厚导致摊铺及压实难度加大，同时防止过薄造成局部塑性变形和早期疲劳开裂。施工过程中，应采用激光摊铺仪和厚度检测仪，严格监控各层施工厚度，保证满足设计厚度要求，防止施工误差影响路面整体性能。

（四）采用功能分区设计提升结构层抗变形能力

针对城市道路不同路段交通荷载差异显著的特点，结构层设计应依据功能分区原则精细化分配材料种类与厚度，实现结构性能针对性提升。主干道、快速路及公交线路等高荷载频繁区段，选用高模量水泥稳定碎石或石灰粉煤灰稳定土作为基层和中基层材料，以增强结构层刚度与耐载能力。设计时需结合车轴荷载等级与交通流量数据，分级确定各区段结构层厚度和材料配比，确保承载力满足高频次重载需求。对于次干路及支路，可采用弹性模量较高的级配碎石材料，适当降低基层厚度以兼顾经济性。分区设计同时需关注环境因素对结构层性能的影响，如地下水位变化及热胀冷缩效应，结合现场水文地质资料调整层间结合处理方案。具体措施包括

在层间采用砂浆粘结层或聚合物改性粘结剂，提高层间结合强度，防止层间滑移和脱层。施工环节应严格执行分区施工方案，按照设计材料配比及厚度分层施工，使用专用机械进行分区压实，确保不同功能区段材料性能和结构厚度符合设计规范。

（五）采用预应力加固技术改善结构层抗裂性能

针对城市老路改造中结构层频繁出现疲劳裂缝及裂纹扩展问题，预应力加固技术被引入以提升结构层整体抗裂能力。具体技术路径是在基层或底基层布设高强度预应力钢筋或钢绞线，通过张拉设备施加适当预应力，使结构层内部产生压应力场，从而有效抵消因交通荷载产生的拉应力集中区域。设计阶段需结合路面结构厚度、材料力学性能以及预计交通荷载水平，采用有限元模拟方法计算预应力大小及钢筋布置间距，确保预应力作用覆盖关键受拉区。钢筋布置应考虑施工便捷性及应力均匀分布，避免局部应力集中。施工过程中，严格控制预应力张拉力及锚固工艺，采用张拉力监测和锚具校核确保预应力损失最小化。预应力施加后，应与高性能水泥稳定土或高标号混凝土基层材料结合使用，提高整体结构刚度和韧性。预应力钢筋埋设深度和位置应精确控制，避免因锈蚀或施工损伤影响耐久性。该技术有效延缓裂缝萌生与扩展，增强结构层疲劳寿命，适用于高等级城市道路及重载密集路段老路改造施工中，提升结构层的综合性能与服役稳定性。

结语

综上所述，城市道路老路改造是一项系统性工程，需全面把握典型病害成因，科学制定针对性的结构层优化设计方案。通过合理选材与配比、加强路基处理与排水系统建设，以及结合区域气候环境实施差异化设计，能够有效提升道路结构的承载能力与耐久性。多层复合结构、高性能改性材料及预应力加固技术的应用，为改造工程提供了技术支撑，保障结构层在复杂荷载和环境条件下保持稳定。未来应进一步深化设计方法与施工工艺的集成优化，强化全过程质量控制，推动老路改造技术持续创新，切实满足城市道路功能升级和可持续发展的需求。

参考文献

- [1] 国玲芬. 市政道路改造中老路路基与路面的利用分析[J]. 中国科技期刊数据库 工业 A, 2024(003): 000.
- [2] 陶卫华. 城市老路“白改黑”路面施工要点研究[J]. 石油化工建设, 2022(004): 044.
- [3] 李祥菲. 老路改造过程中绿化保留迁移设计探究——以合肥市天津路改造为例[J]. 美术馆, 2023, 4(3): 133-135.
- [4] 林浩. 道路改造设计中老路路基, 路面利用问题分析[J]. 住宅与房地产, 2020(9). DOI: CNKI: SUN: ZZFD. 0. 2020-09-249.
- [5] 孙剑. 低等级水泥道路加宽改造路面结构处理技术[J]. 交通世界, 2021(21): 2.