

公路工程中的路面抗车辙性能分析

刘继伟

中国葛洲坝集团路桥工程有限公司 湖南 邵阳 422700

摘要：随着交通量增长与重载车辆增多，路面车辙病害严重威胁公路使用寿命与行车安全。本文系统分析公路工程中路面抗车辙性能，阐述车辙形成机理与分类，从材料、结构设计、施工及环境等维度剖析关键影响因素；提出实验室与现场结合的多维度评价方法；针对性给出材料优化、施工工艺改进及智能化养护管理策略。研究成果为提升路面抗车辙性能提供理论依据与实践指导，对推动公路工程质量提升、降低养护成本具有重要意义。

关键词：公路工程；路面抗车辙性能；影响因素；策略

引言：公路作为交通网络的关键载体，其路面性能直接关系到交通运输效率与安全。近年来我国公路交通流量持续攀升，重载、超载现象普遍，加之极端气候影响加剧，路面车辙病害频发，不仅缩短路面使用寿命，还易引发交通事故，增加养护成本。因此深入分析路面抗车辙性能的影响机制，探索科学有效的优化策略，对保障公路工程质量、促进交通可持续发展具有迫切的现实意义。

1 公路路面车辙的分类

依据成因与表现形式，路面车辙可分为以下失稳型、结构型和磨耗型三类。（1）失稳型车辙。多发生于沥青上面层。其特征为轮迹带处凹陷、两侧隆起，主要由沥青混合料高温稳定性不足导致。当集料骨架嵌挤力无法约束沥青胶浆流动时，车辆荷载会迫使混合料向两侧推移，形成“U”型或“W”型变形。此类车辙在重载交通路段和夏季高温环境下尤为明显。（2）结构型车辙。基层材料强度低、压实度不达标或路基沉降不均，会使路面整体刚度下降，在荷载作用下产生永久性变形。与失稳型车辙不同，结构型车辙通常贯穿整个路面结构层，深度较大且修复难度高，严重时需进行结构性翻修。（3）磨耗型车辙。主要由车辆轮胎与路面的长期摩擦引起，常见于表面磨损严重的道路。轮胎橡胶颗粒的刮擦、制动产生的磨耗以及路面材料的自然风化，都会导致表面集料流失、沥青膜减薄，最终形成浅而宽的凹槽。

2 抗车辙性能的关键影响因素分析

2.1 材料因素

材料是决定路面抗车辙性能的基础要素，以下沥青与集料的性能及适配性起到关键作用。（1）沥青作为胶结材料，其黏度直接影响混合料的黏弹性。高温时，低黏度沥青流动性强，难以约束集料颗粒，易导致混合料

产生塑性变形；而高黏度沥青在荷载作用下能有效抵抗变形，维持结构稳定。改性剂类型显著改变沥青性能，聚合物改性剂可提高沥青的软化点和弹性恢复能力，增强其抗车辙性能；温拌添加剂虽降低施工温度，但过量使用可能削弱沥青与集料的粘附性，间接影响抗车辙能力。（2）集料级配、骨架结构与矿料间隙率（VMA）。合理的级配可形成嵌挤密实的骨架结构，粗集料相互嵌挤形成的内摩阻力，能有效抵抗车辆荷载产生的剪切力；而细集料与沥青组成的胶浆需填充骨架空隙，VMA过大则胶浆不足，混合料易松散；VMA过小则可能导致沥青用量过多，高温下出现流动变形。集料的形状、表面纹理和硬度也影响其嵌挤能力与抗磨耗性，棱角性好、质地坚硬的集料更有利于提升抗车辙性能。沥青用量与油石比需精准适配，沥青用量过高会使混合料偏软，在高温荷载下易发生侧向流动；用量过低则胶结作用不足，导致集料脱粘，加速车辙形成^[1]。

2.2 结构设计因素

以下路面结构设计直接决定了荷载传递与应力分布，对其抗车辙性能产生深远影响。（1）路面结构层位的功能划分是设计核心，上面层直接承受车辆荷载与环境作用，需具备高抗车辙能力，通常采用骨架密实型混合料（如SMA）或添加抗车辙剂提升强度；中下面层则需提供稳定的支撑，分散应力，避免因结构层承载力不足导致的结构性车辙。若层位设计不合理，如上面层过薄或材料性能不达标，将显著降低路面整体抗车辙能力。（2）层间粘结性能与应力分布。良好的层间粘结可确保路面结构协同受力，避免因层间滑移导致的剪切变形；反之，层间粘结薄弱会使荷载无法有效传递，造成应力集中，加速车辙发展。通过洒布粘层油、设置应力吸收层等措施，可增强层间粘结力，优化应力分布。路面结构设计需考虑车辆荷载类型与交通量，重载交通路

段需提高结构层厚度与强度,以减少车辙产生风险;而轻交通路段则可适当降低结构层要求,实现经济性与性能的平衡。

2.3 施工与环境因素

以下施工工艺与环境条件是影响路面抗车辙性能的重要外部因素。(1)压实工艺直接决定路面密实度与结构稳定性,压实温度、遍数和设备组合需严格控制。压实温度过高会导致沥青老化、混合料松散;温度过低则难以压实,空隙率偏大,降低抗车辙能力。压实遍数不足会使路面密实度不达标,在车辆荷载下持续压缩变形;而过度压实可能破坏集料骨架结构,削弱内摩阻力。合理选择压路机类型与组合方式,可确保路面压实均匀,提升整体强度。(2)环境因素对路面抗车辙性能影响显著且持久。极端温度直接改变材料性能,高温使沥青软化、混合料流动性增强,低温则导致沥青脆化、路面开裂,降低结构整体性;降水侵入路面结构层后,会削弱沥青与集料的粘附性,在车辆荷载作用下产生水损害,加速车辙发展;紫外线老化使沥青组分发生氧化,导致沥青变硬变脆,丧失塑性变形能力,降低路面抗疲劳与抗变形性能^[2]。

3 路面抗车辙性能的评价方法

路面抗车辙性能的评价需从实验室模拟到现场检测多维度开展,为材料设计、施工质量把控及路面养护提供依据。其评价方法主要分为实验室测试和现场检测两大类。(1)实验室测试方面。车辙试验是最基础且应用广泛的方法。其中,我国规范常用的车辙试验(轮碾成型试件)通过在规定温度(通常60℃)下,让加载轮以一定速率在试件表面往复碾压,以动稳定度(DS)作为核心指标,计算每产生1mm变形所需的碾压次数。DS值越高,表明沥青混合料抵抗车辙变形的能力越强。美国沥青路面分析仪则更贴近实际行车荷载,能模拟车辆的水平与垂直力,通过测定试件变形量评估抗车辙性能。剪切试验也是重要的实验室评价手段。汉堡车辙试验模拟车辆荷载与水分共同作用,将试件浸泡在水中,进行往复加载,以试件出现裂缝或变形达到规定值的循环次数评价抗水损害与抗车辙能力;动态剪切流变仪通过施加正弦剪切荷载,测定沥青在不同温度、频率下的复数模量与相位角,为沥青结合料的高温性能分级提供数据支持,间接反映混合料的抗车辙潜力。蠕变恢复试验通过加载-卸载过程,分析沥青混合料的弹性与塑性变形比例,量化材料在荷载作用下的永久变形能力。(2)现场检测。激光断面仪是常用设备,通过非接触式测量获取路面纵断面高程数据,计算车辙深度指数,直观反映车

辙病害程度;落锤式弯沉仪通过瞬间冲击荷载,测定路面不同点位的弯沉值,结合有限元反算技术,分析路面结构层模量变化,判断车辙是否由结构层损坏引起^[3]。车载式颠簸累积仪可通过车辆行驶时的振动响应,快速检测路面平整度,间接评估车辙对行车舒适性的影响。

4 公路工程中路面抗车辙性能的优化策略

4.1 材料设计优化策略

4.1.1 沥青结合料性能提升

沥青作为混合料的关键胶结材料,其性能直接影响抗车辙能力。一方面,可通过选择高黏度、高软化点的基质沥青,增强沥青在高温下的抗变形能力。研究表明,针入度较小、软化点较高的沥青在高温荷载下的黏滞阻力更大,能有效抑制混合料的塑性流动。另一方面,采用改性技术可显著改善沥青性能。聚合物改性沥青通过形成交联网络结构,提升沥青的弹性恢复能力与高温稳定性;橡胶粉改性沥青则利用废旧轮胎橡胶颗粒,增加沥青韧性与抗疲劳性能,同时降低车辙风险。纳米材料的掺入,可通过填充沥青微观空隙、增强分子间作用力,进一步优化沥青的高温流变特性。

4.1.2 集料与级配优化设计

集料的级配与特性对骨架结构的形成至关重要。在级配设计上,应优先采用骨架密实型级配,如SMA(沥青玛蹄脂碎石混合料)或OGFC,确保粗集料形成嵌挤结构,细集料与沥青胶浆填充空隙,形成稳定的力学体系。注重集料的物理性能,选择棱角性好、压碎值低、针片状含量少的集料,以增强颗粒间的嵌挤力与摩阻力。通过调整矿料间隙率(VMA)与沥青用量的适配关系,在保证胶结效果的同时,避免因沥青过量导致的混合料软化。例如,在高温重载路段,可适当降低沥青用量,并提高VMA,以提升抗车辙性能。

4.1.3 新型材料与添加剂应用

开发新型抗车辙材料与添加剂是优化的重要方向。抗车辙剂(如PRPLAST.S、木质素纤维)的掺入可有效改善混合料性能,PRPLAST.S通过提高沥青黏度、增强集料粘结力,提升混合料的高温稳定性;木质素纤维则起到吸附沥青、稳定结构的作用,防止沥青流淌与集料离析。温拌沥青技术在保证性能的前提下降低施工温度,减少沥青老化,同时可添加特殊添加剂,改善混合料的压实性能与抗车辙能力。再生沥青混合料的优化利用也是趋势,通过合理设计再生剂配方与新旧料比例,可在环保的同时提升混合料的抗车辙性能。

4.2 施工工艺改进策略

4.2.1 智能压实技术应用

引入智能压实技术,通过实时监控压实温度、遍数、速度及压实度,实现精准施工。如采用带有红外温度传感器的压路机,可实时监测路面温度,确保压实过程在沥青最佳压实温度范围内进行;利用智能压实监控系统,通过GPS定位与传感器数据采集,生成压实度云图,避免漏压、过压现象,保证压实均匀性。优化压实设备组合,采用初压、复压、终压分段作业,配合振动压实与静压交替使用,既能有效提高压实效果,又能避免集料骨架破坏。

4.2.2 层间处治技术强化

良好的层间粘结是保证路面结构协同受力的基础。在层间处治中,可采用高性能粘层油,通过合理控制洒布量与洒布工艺,增强层间粘结强度。对于特殊路段,可设置应力吸收层,通过高弹性材料吸收车辆荷载产生的应力,减少层间剪切变形。在施工过程中,严格控制层间污染,确保下层表面清洁、干燥后再进行上层施工,避免因灰尘、水分等杂质影响粘结效果。

4.2.3 施工质量精细化管控

建立完善的施工质量管控体系,从原材料进场检验到施工过程监控,再到成品验收,实施全流程精细化管理。在原材料环节,严格检测沥青、集料的各项指标,确保材料性能符合设计要求;施工过程中,加强对混合料拌和温度、摊铺温度、碾压工艺等参数的实时监测与调整;成品验收阶段,采用先进检测技术,对路面质量进行全面评估,及时发现并整改潜在问题,确保路面抗车辙性能达到设计标准。

4.3 养护管理策略

4.3.1 车辙早期预警与预防性养护

利用先进的检测技术定期对路面进行车辙深度、平整度等指标检测,结合大数据分析预测模型,建立车辙早期预警系统。通过分析车辙发展趋势,提前制定预防性养护方案,如在车辙深度较浅时采用微表处、稀浆封层等技术进行修复,防止病害进一步扩展。此外,利用智能传感器网络实时监测路面温度、湿度、应力等参

数,结合交通荷载数据,实现车辙病害的动态预测与精准养护。

4.3.2 车辙修复技术优化

对于已形成的车辙,根据其类型与严重程度选择合适的修复技术。对于轻度失稳型车辙,可采用热再生技术,通过加热软化路面,重新压实恢复平整度;对于深度较大的结构性车辙,则需进行铣刨重铺,更换损坏的结构层材料,并优化新铺层的抗车辙性能。在修复过程中,注重新旧路面的衔接处理,采用专用的界面剂增强层间粘结,避免因修复不当导致新的车辙问题。

4.3.3 养护决策智能化

引入人工智能与机器学习技术,构建基于路面性能数据、交通荷载、环境条件的养护决策模型。通过对大量历史数据的学习与分析,自动推荐最优养护方案,实现养护资源的合理配置。建立养护效果后评估机制,对实施的养护措施进行跟踪评价,不断优化养护决策模型,提高养护管理的科学性与有效性^[4]。

结束语:本研究全面揭示了公路路面抗车辙性能的关键影响因素,构建了系统的评价与优化体系。但在极端环境适应性、多因素耦合作用机制等方面仍需深入探索。随着新材料、新技术不断涌现,应进一步加强智能感知、大数据分析人工智能技术在车辙防控中的应用,完善全寿命周期管理体系,推动公路路面抗车辙技术向绿色化、智能化方向发展。

参考文献

- [1]孙梦林,王修善.灌注式半柔性路面技术在道路抗车辙改造工程中的应用[J].交通世界,2025(1):106-108.
- [2]邢林林.公路工程半柔性抗车辙路面施工技术[J].交通世界,2024(12):86-88.
- [3]王明玉,段雨阳,徐立廷,魏永峰,姜帅,徐世法.旧沥青路面双层芯样抗车辙性能评价[J].石油沥青,2025,39(1):50-56.
- [4]张向中.公路工程半柔性抗车辙路面施工技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2024(12):047-050.