

沥青混合料抗车辙性能影响因素分析与优化设计

苏文方 刘梦莹

郑州路桥建设投资集团有限公司 河南 郑州 450000

摘要：沥青路面车辙问题严重影响道路使用寿命与行车安全，提升沥青混合料抗车辙性能成为道路工程领域的关键课题。研究表明，材料性质、级配设计、施工工艺及外部环境等多因素共同作用于沥青混合料抗车辙性能。通过深入剖析各因素作用机理，针对性提出优选材料、优化级配、改进工艺及环境适应性设计等优化策略，为提升沥青路面抗车辙能力提供理论依据与实践指导，对保障道路长期稳定运行具有重要意义。

关键词：沥青混合料；抗车辙；性能影响；因素分析；优化设计

引言

随着交通流量持续增长与重载车辆增多，沥青路面车辙病害频发，不仅降低路面平整度，影响行车舒适性，更威胁交通安全，增加养护成本。深入研究沥青混合料抗车辙性能影响因素并进行优化设计，是提升路面使用性能、延长道路服役寿命的关键。本文从材料性质、级配设计、施工工艺及外部环境等方面，系统分析影响沥青混合料抗车辙性能的关键因素，并提出针对性优化设计策略，为沥青路面工程建设提供技术支撑。

1 沥青混合料抗车辙性能概述

沥青混合料抗车辙性能是评价沥青路面耐久性与服役性能的关键指标，直接影响道路使用寿命与行车安全。在交通荷载反复作用下，沥青路面产生的车辙变形不仅导致路面平整度下降，增加车辆行驶阻力与燃油消耗，还可能引发安全隐患。车辙形成过程涉及沥青混合料内部集料骨架的错动、沥青胶浆的流动以及外界环境因素的耦合作用，其本质是材料在持续荷载下的累积塑性变形。从材料组成角度，沥青混合料是由集料、沥青胶结料、矿粉及其他添加剂组成的多相复合材料。集料作为骨架结构，其级配类型、颗粒形状与粒径分布对混合料抗车辙性能起决定性作用。间断级配或骨架密实型级配能形成嵌挤结构，有效限制集料的相对位移；表面粗糙、棱角分明的集料可增强颗粒间的机械咬合作用，提高抵抗剪切变形能力。沥青胶浆则如同黏结剂，其流变特性受沥青自身性能、沥青用量及矿粉-沥青比的影响。高温性能优异的沥青结合料具有较低的温度敏感性与较高的黏度，能有效抑制胶浆在荷载下的流动；合理控制沥青用量与矿粉掺量，可优化沥青胶浆的劲度模量，平衡材料的柔韧性与抗变形能力。外界环境与荷载条件同样不可忽视。高温气候下，沥青黏度降低，混合料抗剪强度显著下降，加速车辙发展；重载交通与渠化

交通形成的高频次集中荷载，加剧路面局部变形累积。通过室内车辙试验与现场观测相结合的方法，采用动稳定度、永久变形量等指标量化评价沥青混合料抗车辙性能，有助于指导工程实践中材料设计与施工工艺优化，提升沥青路面的长期服役性能。

2 沥青混合料抗车辙性能影响因素分析

2.1 材料性质因素

沥青作为沥青混合料的胶结材料，其性能直接决定混合料的黏弹性与抗变形能力。高黏度沥青凭借出色的内聚力，能有效约束集料颗粒的相对位移，延缓车辙形成。针入度较小、软化点较高的沥青在高温下仍保持较高的劲度模量，降低混合料在荷载作用下的流动性。改性沥青通过添加聚合物、橡胶粉等外掺剂，显著改善沥青的高温稳定性与抗疲劳性能，例如SBS改性沥青形成的三维网络结构，大幅提升沥青的弹性恢复能力，减少永久变形积累。集料作为沥青混合料的骨架结构，其物理力学性质对车辙抵抗能力至关重要。质地坚硬、棱角丰富且表面粗糙的集料，能在相互嵌挤中形成较强的内摩阻力，增强混合料抵抗剪切变形的能力。石灰岩等碱性集料与沥青的化学粘附性良好，有效避免因水损害导致的沥青剥落，维持混合料结构完整性，进而提升抗车辙性能。矿粉作为沥青混合料的重要组成部分，其活性与颗粒级配影响沥青胶浆的性能。高活性矿粉与沥青形成的胶浆具有更高的黏度与强度，填充集料空隙后，增强混合料的密实度与整体稳定性，减少荷载作用下的塑性变形^[1]。

2.2 级配设计因素

沥青混合料的级配设计决定其内部结构类型与力学性能。连续级配混合料中，集料粒径分布均匀，形成较为密实的结构，但细集料含量较高时，易在高温重载下产生较大的塑性变形。间断级配混合料通过剔除特定粒径范围的集料，形成粗集料相互嵌挤的骨架-空隙结

构,这种结构赋予混合料较高的内摩阻力,在荷载作用下粗集料骨架承担主要应力,有效抑制车辙发展。级配曲线的关键筛孔通过率对混合料性能影响显著,尤其是4.75mm、2.36mm等筛孔,其通过率的微小变化会改变集料的嵌挤状态与沥青胶浆填充程度。当关键筛孔通过率处于合理区间时,既能保证粗集料形成稳定骨架,又能使沥青胶浆充分填充空隙,实现内摩阻力与黏结力的平衡,提升抗车辙性能。矿质集料与沥青的比例直接影响混合料的性能,沥青用量过高会使混合料过于柔软,在高温下易发生流动变形;沥青用量过低则导致集料裹覆不充分,降低混合料的黏结强度与耐久性。合理的油石比应确保沥青既能充分裹覆集料,又能在集料间形成合适厚度的沥青膜,提供足够的黏结力与弹性恢复能力,抵抗车辙产生。

2.3 施工工艺因素

沥青混合料的拌制过程决定其均匀性与性能一致性。拌和温度与时间对沥青裹覆效果及混合料质量至关重要,过高的拌和温度会导致沥青老化,降低其黏结性能;拌和时间不足则使集料裹覆不均匀,影响混合料的整体强度与稳定性。精确控制拌和温度与时间,使沥青均匀裹覆集料颗粒,形成稳定的沥青-集料体系,是保证抗车辙性能的基础。摊铺工艺直接影响沥青路面的平整度与密实度,摊铺速度过快会导致混合料离析,局部压实度不足,在车辆荷载作用下易产生变形;摊铺温度过低则会增加混合料的摊铺阻力,难以形成均匀密实的结构层。合理控制摊铺速度与温度,采用梯队作业等方式保证摊铺连续性与平整度,为后续压实创造良好条件。压实是决定沥青路面密实度与强度的关键环节,压实机械的类型、吨位与碾压遍数对压实效果有显著影响。轻型压实机械难以达到规定的压实度,重型压实机械若操作不当易造成集料破碎,破坏骨架结构。科学的压实工艺应根据混合料类型与摊铺厚度,合理组合初压、复压与终压工序,采用静压、振动压实等不同方式,使混合料达到最佳密实状态,增强抵抗车辙变形的能力^[2]。

2.4 外部环境因素

温度是影响沥青混合料抗车辙性能的关键环境因素,高温环境下沥青黏度降低,混合料呈现黏流态,在车辆荷载反复作用下易发生塑性变形。随着温度升高,沥青的劲度模量呈指数下降,混合料的抗剪强度大幅降低,车辙发展速度显著加快。不同地区的高温持续时间与峰值温度差异,导致沥青路面车辙病害程度不同。湿度对沥青混合料性能产生多重影响,水分侵入会削弱沥青与集料的黏附性,引发剥落现象,破坏混合料结构完

整性。在水与荷载共同作用下,沥青混合料内部产生动水压力,加剧集料与沥青的分离,降低混合料的强度与稳定性,加速车辙形成。车辆荷载的大小、作用频率与分布形式直接影响沥青路面的受力状态,重载车辆的轴载远超设计标准,对路面产生较大的竖向压力与水平推力,导致沥青混合料产生较大的塑性变形。车辆的频繁制动、启动与转向,使路面承受复杂的交变应力,加速车辙的发展。交通流量越大,车辆荷载作用次数越多,沥青路面的疲劳损伤积累越快,抗车辙性能下降越明显。

3 沥青混合料抗车辙性能优化设计策略

3.1 优选材料

(1) 沥青作为沥青混合料的胶结材料,其性能对混合料抗车辙能力影响深远。选择高粘度、高软化点的优质沥青,可增强沥青与集料间的粘附力,有效抵抗高温下的流动变形。如采用PG(性能等级)分级体系选择合适的沥青,确保其在高温地区能保持良好的稳定性,减少因沥青软化导致的车辙产生。(2) 集料的物理力学性质直接关系到混合料骨架结构的稳定性。优先选用质地坚硬、表面粗糙、棱角性好的集料,能在混合料内部形成嵌挤结构,提供更强的抗剪切能力。石灰岩、玄武岩等集料因其良好的力学性能与沥青的粘附性,常被用于高抗车辙需求的路面工程。(3) 合理添加外掺剂是提升抗车辙性能的有效手段。纤维类外掺剂具有独特优势,它能均匀分散在沥青混合料中,像无数细小的骨架般起到加筋作用,有效约束沥青流动。抗车辙剂同样作用显著,它通过改变沥青的流变性能和集料的嵌挤状态,增强混合料的高温稳定性,显著提高其抗车辙能力。

3.2 优化级配设计

(1) 级配类型的选择是优化设计的关键。间断级配能形成骨架-空隙结构,粗集料相互嵌挤形成稳定骨架,有效抵抗荷载变形;连续级配通过合理控制不同粒径集料的比例,使细集料填充粗集料空隙,在保证一定嵌挤力的同时,增强混合料的密实度。根据道路使用需求和交通荷载特点,选择合适的级配类型,可优化混合料内部结构,提升抗车辙性能。(2) 精确控制关键筛孔通过率对级配优化至关重要。对于粗集料主导的级配,4.75mm筛孔通过率影响骨架结构的形成,适当降低该筛孔通过率,可增加粗集料的比例,强化骨架嵌挤作用;对于细集料填充的级配,0.075mm筛孔通过率影响混合料的密实度和粘结性能,合理控制其比例,能确保沥青与集料充分裹覆,提升混合料整体强度。(3) 引入体积参数优化级配设计。通过控制矿质集料间隙率(VMA)、沥青饱和度(VFA)等参数,保证混合料在不同温度和

荷载条件下的稳定性。合适的VMA能为沥青提供足够的容纳空间,避免高温时沥青膨胀导致混合料失稳;合理的VFA则确保沥青与集料的有效粘结,防止混合料松散,从而提高抗车辙性能^[3]。

3.3 改进施工工艺

(1) 温度控制是沥青混合料施工的核心环节。严格把控沥青加热温度、集料加热温度和混合料出场温度,确保沥青具有良好的流动性,与集料充分裹覆。在摊铺过程中,控制摊铺温度不低于规定值,保证混合料的摊铺质量;压实阶段,选择合适的初压、复压和终压温度,在沥青混合料仍处于高温、具有较好塑性时完成压实,形成密实稳定的结构,提高抗车辙能力。(2) 压实工艺直接影响混合料的密实度和均匀性。采用合理的压路机组合和碾压方式,如初压采用钢轮压路机静压,以稳定混合料结构;复压采用振动压路机,增强压实效果;终压采用胶轮压路机消除轮迹,提高路面平整度。控制碾压速度和遍数,避免因碾压不足导致混合料不密实,或因过度碾压破坏骨架结构,确保压实度达到设计要求,提升路面抗车辙性能。(3) 施工过程中的均匀性控制不容忽视。保证沥青混合料在拌和、运输和摊铺过程中的均匀性,防止离析现象发生。离析会导致局部混合料级配异常,影响整体强度和稳定性。通过优化拌和工艺、合理选择运输车辆和卸料方式,以及采用先进的摊铺设备,确保混合料均匀摊铺,形成均匀一致的路面结构,增强其抗车辙能力。

3.4 环境适应性设计

(1) 针对高温地区,需着重提升沥青混合料的高温稳定性。除选用高粘度、高软化点沥青外,可调整级配增加粗集料比例,形成更稳定的骨架结构。采用耐高温性能好的外掺剂,进一步改善沥青混合料的高温流变性能,降低因高温导致的车辙风险。在设计中,考虑高温环境下路面的温度场分布,优化结构层组合,减少热量传递对沥青混合料的影响。(2) 低温地区则需提高沥

青混合料的低温抗裂性,避免因低温开裂引发车辙。选择低温延度大、粘度低的沥青,保证混合料在低温下具有良好的柔韧性。调整级配使细集料比例适当增加,提高混合料的密实度和粘结性能,减少低温收缩裂缝的产生。添加能改善沥青低温性能的外掺剂,增强混合料的低温抗裂能力,确保路面在低温环境下的稳定性。(3) 潮湿地区应增强沥青混合料的水稳定性,防止因水损害导致路面结构破坏进而产生车辙。选用与集料粘附性好的沥青,并添加抗剥落剂,提高沥青与集料的粘结力。优化级配设计,形成密实的结构,减少水分侵入。加强施工过程中的防水措施,如保证路面排水系统畅通,避免路表水滞留,降低水对沥青混合料的侵蚀作用,提升路面抗车辙性能^[4]。

结语

综上所述,沥青混合料抗车辙性能受材料、级配、施工及环境等多方面因素综合影响。通过系统分析各因素作用机制,从材料选择、级配优化、工艺改进及环境适配等维度制定优化设计策略,可显著提升沥青混合料抗车辙能力。这些研究成果对指导沥青路面设计与施工、延长道路使用寿命、降低养护成本具有重要现实意义。未来仍需结合新材料与新技术,持续深化沥青混合料抗车辙性能优化研究。

参考文献

- [1] 张玉秀,李萍,范鑫源.低围压沥青混合料抗剪性能试验及影响因素分析[J].广西科技大学学报,2023,34(3):45-52,61.
- [2] 傅珍,武孟,常晓绒,等.复合增强剂沥青混合料性能影响因素分析[J].公路,2020,65(2):218-224.
- [3] 盛善望,杨晚生,王福琴,等.基于超标准(高温重载)试验条件的抗车辙沥青混合料优化设计研究[J].公路,2023,68(6):186-193.
- [4] 单承新,龚天松,姜振军,等.主动抗老化智能型SMA沥青混合料优化设计[J].山东交通科技,2023(2):15-18.