

高速公路沥青路面车辙病害处治技术应用研究

曾文俊

(湖南高速公路集团有限公司衡阳分公司, 湖南 衡阳 421000)

摘 要 随着高速公路交通量持续增长和重载车辆比例不断提高, 沥青路面车辙病害已成为影响道路服役性能和行车安全的重要问题。本文围绕高速公路沥青路面车辙病害治理展开研究, 在分析交通荷载、结构层性能、层间状态、施工质量及高温环境等主要致因的基础上, 系统梳理了抗车辙结构强化、分层铣刨重构、界面恢复、压实重建及复合治理等关键技术路径, 旨在为高速公路车辙病害的科学处治与养护决策提供参考。

关键词 高速公路; 沥青路面; 车辙; 病害处治

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.018

0 引言

沥青路面因平整度好、行车舒适、施工维修方便等特点, 被我国高速公路大量采用。车辙作为沥青路面最典型的结构性破坏形式之一, 其生成机理受多维度因素共同作用, 尤其近年来国内路网交通荷载持续攀升, 叠加重载交通反复作用、极端高温环境影响、路面结构性能自然衰减等多重条件耦合, 车辙病害越来越严重。车辙不但会破坏路面的整体性, 还会引起裂缝、拥包、积水等次生病害, 缩短道路的使用寿命。因此, 有必要从成因机理和治理技术两方面, 对高速公路沥青路面车辙病害进行系统的探究。

1 案例概况

本文以衡大高速衡阳段为研究对象。该路段于 2003 年 7 月开工、2005 年 12 月通车, 路线全长 25.93 km, 采用双向四车道高速公路标准, 路基宽 26 m, 设计速度 100 km/h, 路面结构为 4 cm SBS 改性沥青 AC-13 上面层、5 cm AC-20 中面层、6 cm AC-25 下面层、36 cm 水泥稳定碎石基层和 20 cm 水泥稳定碎石底基层, 总厚度 71 cm。2020-2024 年 AADT 分别为 14 645、14 804、13 307、14 997、15 187 辆/d, 2022-2024 年增长明显。2024 年该路段 PQI 为 93.53, RDI 为 94.45, 但异常路段集中在上行 K021+000~K023+000、下行 K000+862~K002+000 等区间, PCI 下降明显。取芯结果可知, K3+250、K12+715、K14+900 等车辙点多为中面层厚度不够、孔隙大、层间无黏结; K23+200 与 K10+400 波峰波谷对

比又显示, 上中面层变形大、下面层变化小, 说明衡大高速车辙主要是上中面层失稳变形和压实不足造成的。

2 常见的沥青路面车辙病害形成原因

2.1 交通荷载持续增长与重载车辆反复作用

交通荷载增长是造成沥青路面车辙的直接外部原因。衡大高速衡阳段 2020-2024 年年平均日交通量分别为 14 645、14 804、13 307、14 997、15 187 辆/d, 虽然 2020-2022 年受外部环境影响出现短期波动, 但 2022-2024 年又快速回升, 说明该路段始终处于较高交通荷载水平。2024 年车型构成中, 特大货车占 9.33%, 集装箱车占 2.34%, 大于 25 t 车辆合计 11.67%, 虽然没有超过 20%, 但是由于长期、重复、连续的轴载作用, 仍然会对轮迹带区域产生较大的竖向压缩和水平剪切应力。相关资料表明, 衡炎高速 2024 年特大货车和集装箱车合计占总交通量的 14.71%, 说明该区域高速公路货运交通压力大。车辆荷载反复叠加不但会加快沥青层永久变形累积, 还会使路面由局部压密慢慢发展成明显的车辙。

2.2 路面结构层厚度不足与中上面层抗变形能力偏弱

车辙病害不是只表现在表面凹陷上, 它是路面结构层受力失衡、抗变形能力差所致。衡大高速原设计路面结构总厚度为 71 cm, 上面层 4 cm、中面层 5 cm、下面层 6 cm。现场取芯结果表明, 大部分典型的病害点上中面层厚度小、孔隙大、整体强度差。K3+250

作者简介: 曾文俊 (1985-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 高速公路建设、高速公路养护。

车辙点为“轮迹带芯样上中面层厚度小、孔隙大”，K12+715、K14+900 车辙点为“上中面层开裂、中面层有孔隙，设计结构厚度与之存在差异”。对 K23+200、K10+400 车辙、拥包断面的波峰、波谷取芯对比可知，波峰、波谷之间上中面层厚度有较大差异，而下面层变化不大，说明车辙多发生在上中面层。由此可见，上中面层结构厚度不够、骨架稳定性差的时候，路面在交通荷载的作用下容易出现失稳流动、压密变形^[1]。

2.3 层间黏结不良与结构协同工作能力下降

层间黏结状况影响沥青路面多层结构能否形成整体受力体系，也是车辙病害发展变化的主要内部因素。病害路段普遍存在着“无黏结”或者“黏结差”的情况。K1+300 横向裂缝、拥包点在中面层发展层位，记录为无黏结；K6+480 车辙、裂缝点发展到基层，也显示为无黏结；K22+230 车辙、拥包点则表现为层间黏结差，中下面层取不出。由此可以看出面层、中面层和下面层之间没有形成有效的协同传力，车辆荷载不能均匀地向下扩散，造成应力集中在局部层位上，使轮迹带区域更容易发生横向流动和局部失稳^[2]。尤其在层间黏结不足的情况下，上中面层在受剪时首先会出现滑移、剥离、开裂的现象，车辙也不再是单纯的压密，而会和拥包、裂缝等复合病害一起出现。

2.4 施工压实不足与混合料离析导致的压密型变形

压实度不够、混合料分布不均都会造成压密型车辙。衡大高速车辙深度小于 15 mm 的病害，经过多年的运营以后基本可以判定为压密型车辙，其形成机理主要是由于施工阶段混合料摊铺温度低、压实遍数不够、初始压实度不够造成的。对典型病害点的取芯调查发现，多处芯样存在孔隙大、芯样整体强度低、中面层含泥量大、徒手可捏碎等现象，说明部分路段在施工过程中已经埋下了密实性差、材料离析的隐患。其次，拥包的形成原因有“沥青混合料摊铺不均匀，局部细料集中”和“基层或者下面层未压实，强度不够，发生变形位移”。在这种情况下，通车后反复的车轮作用会造成沥青层再次压实，使局部轮迹带继续下沉，慢慢形成车辙。因此，施工质量缺陷不会立刻完全显现出来，而是在运营期通过压密型变形慢慢暴露出来^[3]。

2.5 高温环境与裂缝反射共同诱发复合型车辙病害

温度敏感性是沥青材料的基本特性，高温环境会使混合料的黏度和抗剪强度降低，从而产生失稳型车辙。高温季节如果沥青混合料高温稳定性差，重型车辆荷载会造成结构内部出现剪切变形和侧向流动，最后形成两侧隆起的 W 形车辙。衡大高速典型病害调查

也发现，车辙常常和纵横向裂缝、拥包等病害一起出现。K1+200、K6+100、K10+120、K24+870 等处车辙和裂缝同时存在，裂缝可以延伸到中面层、下面层甚至基层。重度横向裂缝一般贯穿整个路面结构，属于半刚性基层反射裂缝；纵向裂缝多在轮迹带，呈上宽下窄的形态，主要是由于超载、高胎压以及表面剪应力过大造成的。高温软化、裂缝反射、层间受损三者共同作用的时候，路面结构的完整性会进一步降低，车辙也会从单一变形发展成裂缝、拥包、车辙并存的复合病害^[4]。

3 高速公路沥青路面车辙病害处治技术应用

3.1 面向重载交通作用的抗车辙结构强化技术

高速公路车辙治理中重载交通长期作用技术的应用，就是提高路面结构对重复轴载、高剪应力的适应性。国内工程实践一般不会按照原设计标准对路面进行恢复，而是根据运营期的交通组成重新计算结构的承载水平，然后采取相应的抗车辙加强措施。上面层多用 SBS 改性沥青 AC-13C、SMA-13 等高温稳定性能好的混合料，中面层为抗车辙主功能层，一般采用 AC-20C、高模量沥青混合料或掺加抗车辙剂的改性混合料，提高抗剪强度及抵抗轮迹带侧向流动的能力。重载路段处治后一般要求车辙试验动稳定度不小于 3 000 次/mm；重载交通、高温区工程控制值一般提高到 6 000 次/mm 以上，特重载区还会提高。如果调查结果显示主要行车道的受力远远大于超车道，则会采用不同的结构设计来处理，对于行车道的轮迹带进行局部加厚或者中面层加强，形成表层抗滑、中层抗剪、下层承载的分工体系。该类技术的本质就是用材料等级提高、层厚优化、交通适应性设计来保证处治后结构在更高的荷载作用下仍能保持稳定^[5]。

3.2 面向结构薄弱层位的分层铣刨与厚度重构技术

对于中上面层厚度不够、结构功能衰减严重的路面路段，一般采用分层铣刨和厚度重塑技术来恢复路面各层的受力平衡和变形控制能力。该类技术的关键并不在于简单的“刨除—摊铺”，而在于根据病害层位诊断的结果来准确地确定铣刨深度、重铺层次和材料组合。一般情况下，如果病害主要在上面层，可以采用 4 cm 左右的表层铣刨后重铺功能层；如果车辙已经波及中面层，通常会进行上中面层联合铣刨，重新铺筑 4 cm 上面层加 5 cm ~ 6 cm 中面层；如果下面层的承载能力也被影响到，那么就需要扩大处治范围，形成上中下面层的整体恢复模式。处治过程中各层厚度的恢复不是简单的复原原断面，而要根据目前的交通等级和服役要求来适当提高中面层厚度或者使用更

高等级的材料提高其抗剪稳定性。施工完成后,应通过钻芯检测厚度、压实度、层位均匀性来保证新结构符合设计要求。分层铣刨和厚度重构可以改善轮迹带区域的结构连续性以及应力扩散情况,属于治理中重度车辙、防止深层继续变形的重要技术途径。

3.3 面向层间失效的界面恢复与黏结增强技术

车辙治理的效果很大程度上取决于新旧层之间能否重新形成稳定的黏结和传力关系。因此,界面恢复、黏结增强已经成为国内高速公路车辙病害处治的常规技术之一。具体应用时,铣刨后原路面必须先做精细化处理,即清除粉尘、松散颗粒、残余浆皮、污染物,保证界面粗糙度和清洁度符合要求;然后喷洒黏层材料,常用的有普通乳化沥青、改性乳化沥青、高黏界面剂等。按照常见的施工控制要求,黏层油喷洒量一般控制在 $0.3\text{ L/m}^2 \sim 0.6\text{ L/m}^2$,保证不出现过量形成滑移面,也不出现过少造成界面脱空的情况。重载、高温、频繁制动的路段可以使用高黏高弹型界面材料来提高层间的抗剪强度。原结构存在明显的滑移、层间剥离等现象时,宜采用局部翻修的方法进行处理,不能用简单的表层黏结来恢复。部分工程还会在病害多发区设置应力吸收层、防反射裂缝层或者增强型黏结层,从而减小层间剪应力的集中。该技术的核心就是把车辙处治由单层修复提高到多层协同受力的重建层面,从而大大提高处治后整体稳定性、耐久性。

3.4 面向压实重构的混合料优化与施工控制技术

车辙病害治理中重新形成均匀、密实、骨架稳定的混合料结构,在工程中占有非常重要的作用。因此,以混合料优化和施工控制为基础的压实重构技术被广泛地应用到压密型车辙以及局部离析路段的处治上。在具体应用中,首先要对原路面材料进行抽提、筛分、配合比复核,重新校核油石比、矿料级配、骨架密实性,防止因配合比简单沿用原配合比而造成病害重现。处治后的混合料一般空隙率控制在 $3\% \sim 5\%$,沥青饱和度控制在 $65\% \sim 75\%$,马歇尔稳定度不小于 8 kN ,流值控制在 $2\text{ mm} \sim 4\text{ mm}$ 之间,兼顾高温稳定性与耐久性。施工环节中,拌和温度、运输保温、摊铺温度和碾压温度必须形成一个连续的控制链,防止由于温度损失过快或者碾压时机滞后造成新的压实不足。高速公路养护工程一般要求压实度达到最大理论密度的 93% 以上或者试验室标准密度的 98% 以上,用钻芯检测和现场密度测试进行复核。对出现局部细料富集、粗料架空的路段要重点控制摊铺均匀性,必要时采用分仓供料、连续摊铺工艺减少离析。

3.5 面向高温与裂缝耦合作用的复合治理技术

对于同时存在高温流动变形和裂缝扩展风险的路段,一般采取高温稳定性改善与裂缝控制并重的复合治理技术。表层和中面层优先选用高温性能更好的改性沥青体系,即SBS改性沥青、高黏高弹改性沥青或者掺加抗车辙剂的混合料,以提高软化点、黏度和弹性恢复能力,减小夏季高温条件下黏塑流动倾向。同时,对伴生横向裂缝、纵向裂缝或者反射裂缝的路段,根据裂缝来源设置抗裂层、应力吸收层、防反射裂缝层或者玻纤格栅等中间功能层,减小裂缝向上扩展和轮迹带裂缝再开裂的可能。高温区、长大纵坡区的工程中还会在中面层加强抗剪结构,在表层兼顾抗滑和耐久要求,形成高温抗流动、界面抗裂缝、结构抗剪切的复合控制模式。技术评价除了常规平整度、压实度外,还要对动稳定度、冻融劈裂残留强度比、渗水系数、后期RDI、PCI的变化情况进行综合分析,从而判断处治效果。该类技术的应用价值在于,不把车辙和裂缝分开进行治理,而是依靠材料、结构、功能层三者共同配合来提高高速公路复杂病害条件下整体治理水平。

4 结束语

高速公路作为国家路网的重要组成部分,其路面的健康状况直接关系到行车安全及运输效率。高速公路沥青路面车辙病害具有形成机理复杂、影响因素多元和发展过程累积性强等特征。针对不同致因,应在充分诊断病害性质和结构状态的基础上,合理选择抗车辙结构强化、层位重构、界面恢复、压实优化及高温裂缝复合治理等技术路径。只有坚持“成因分析—技术对应—精准处治”的治理思路,才能有效提高车辙病害治理质量,延长高速公路路面使用寿命,并为后续养护管理提供更可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 黄烽. 沥青路面车辙病害成因及铣刨加铺技术[J]. 大众标准化, 2026(06):58-60.
- [2] 张阳, 杨超平. 沥青路面早期车辙病害影响因素与控制措施[J]. 城市建设, 2026(06):112-114.
- [3] 胡潇, 徐超超. 高速公路沥青路面车辙病害处治措施[J]. 工程技术研究, 2026, 11(02):145-147.
- [4] 梁德强, 谢严君, 王凯, 等. 沥青路面早期车辙病害影响因素分析[J]. 建材世界, 2024, 45(06):102-105.
- [5] 杨润泽, 李尽旺. 高速公路改扩建既有沥青路面病害处治技术研究[J]. 建筑机械, 2023(12):16-21.