不同类型抗车辙路面在普通干线公路重载车辆连续制动路段服役性能研究

文／刘　峰　滨州市公路勘察设计院有限公司
杜　松　滨州市公路勘察设计院有限公司
董丽丽　滨州市公路事业发展中心
于金思　滨州市公路勘察设计院有限公司

摘　要： 本文根据我市近年来在大中修养护工程中处理路面车辙时，特别是处理灯控路口等连续制动路段的车辙时，采用的四种抗车辙路面方案。通过完工后对各类型抗车辙路面进行检测评价，以便总结经验，有针对性地制定抗车辙路面方案。

关键词： 抗车辙路面；跟踪研究；制动路段；沥青路面

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.09.069

引言

随着社会经济的快速发展与人民生活水平的提高，公路交通量日渐加大，货物运输量逐年提升，且车载运输向重型化不断发展，在车辆荷载反复作用下沥青路面出现了裂缝、车辙、拥抱等早期病害，其中，车辙病害作为沥青路面主要病害之一，不仅降低车辆行驶的舒适性和路面耐久性，而且会给行驶过程中的车辆带来安全隐患。

一、沥青路面车辙的原因分析及分类

车辙的产生主要受外部、内部两方面因素的影响，其中主要的外部因素主要是指气温、荷载以及路面纵坡等，内部因素则主要与沥青混合料的材料、设计、施工等有关。车辙产生的内因主要取决于沥青混合料的抗剪强度，采用沥青混合料的粘结力和内摩擦角来表征矿料和沥青对沥青混合料抗剪强度的影响。车辙产生的外因主要指气候条件和交通条件的变化。其中，气候条件包括气温、日照、辐射、降雨量等，温度是沥青路面产生车辙的重要因素。交通条件的影响包括荷载、轮压、行车速度、交通渠化等。由于渠化交通的影响，车辙成为路面主要的病害之一[1]。沥青路面车辙是行车道轮迹带上产生的竖向永久变化。根据车辙的不同形成过程，主要分为四大类型：失稳型车辙、磨耗型车辙、结构型车辙和压密型车辙。

（一）失稳型车辙

失稳型车辙是目前研究的主要对象。产生的原因主要是由于路面在交通荷载作用下，路面强度不足以抵抗交通荷载作用于它上面的剪切应力，导致面层材料失稳及其内部材料横向流动和路面永久变形。大多发生在轮迹位置处，表现为轮胎两侧路面上凸，中间下凹的情况。此类车辙主要出现在国省道干线公路路口、限速标志前等减速缓行区，交通荷载对路面的作用时间较长。

（二）磨耗型车辙

磨耗型车辙的形成是由于沥青路面在较大交通量及雨水等作用下，路面与汽车轮胎相互作用使路面磨损，导致面层内的沥青集料脱落。这种类型车辙的形成是由于路面材料耐磨性较低，轮胎与路面长期频繁地接触引起的。

（三）结构型车辙

这种车辙的形成是由于路面在交通荷载作用下结构层发生永久变形而产生的。由于目前沥青路面多采用半刚性基层路面，这种类型的车辙极少出现。

（四）压密型车辙

压密型车辙多为施工时碾压不足，开放交通后路面二次碾压造成的。压密型车辙一般是路面投入使用后不久就会表现出来。

二、抗车辙处理方案与优缺点

我市近年来大中修路口车辙病害处理方案，主要有水泥混凝土路面、高模量改性沥青混凝土（30 号沥青）、抗车辙混合料、灌入式半柔性复合路面等 4 种不同抗车辙方案，各处理方案的抗车辙原理及优缺点如下：

（一）水泥混凝土路面

1. 抗车辙原理

①高强度与刚性：水泥路面主要由水泥混凝土构成，具有较高的强度和刚性。这种特性使得水泥路面能够承受较大的荷载而不易产生变形，从而避免车辙的形成。②稳定性好：水泥混凝土路面体积稳定性较好，不易因温度变化、湿度变化等因素产生显著的体积变化，有助于保持路面的平整度和减少车辙的产生。③耐磨性强：水泥混凝土路面具有较高的耐磨性，能够抵抗车辆轮胎的磨损作用，保持路面的长期平整和完好[2]。

2. 优缺点

（1）优点

①强度高、刚度大：水泥混凝土路面具有较高的抗压、抗弯和抗磨耗的力学强度，能够承受较大的交通荷载，具有较高的承载能力和扩散载荷的能力。②稳定性好：水泥路面的力学强度不受自然气候温度和湿度的影响，热性、水稳定性和时间稳定性都较好。③维护成本低：由于水泥混凝土路面坚固耐久，后期养护维修费用相对较少。

（2）缺点

①初期造价高：相比其他路面材料，水泥混凝土路面的初期投资成本较高。②沥青路面改造为水泥路面，

需对原路面结构进行挖除新建，改造时间长，对交通影响大。③路面标线与水泥混凝土路面结合性差，标线易磨损脱落，对行车安全造成一定影响，同时增加后期养护投资和工作量。④路面抗滑性能较差，特别是雨雪天气，影响行车安全。⑤一旦水泥混凝土路面出现大面积损坏情况，修复工作相对困难。

（二）高模量改性沥青混凝土

1. 抗车辙原理

①采用高模量沥青，增强抗变形能力：高模量沥青混合料通过采用低标号硬质沥青 + 外掺 SBS 的方式，提高沥青混合料的模量。混合料在受到车辆荷载作用时，能够更有效地抵抗塑性变形，从而减少车辙的产生。②改善混合料内部结构：高模量沥青混合料通过优化矿料级配，增强粗集料间的嵌锁作用，形成更加稳定的骨架结构，在车辆荷载作用下能够更好地分散应力，减少局部变形[3]。③提高高温稳定性：高模量沥青混合料通过提高沥青的粘度、增强矿料骨架的稳定性等方式，有效降低了高温下的蠕变行为，从而提高了抗车辙能力。

2. 优缺点

（1）优点

①强度与刚性高：高模量沥青混合料的模量高于传统沥青混凝土，能够承受更高的压力和车辆荷载。②延长使用寿命：高模量改性沥青混凝土路面的疲劳寿命较常用基质沥青混合料显著提高，这有助于减少路面的维修和重建频率，降低长期维护成本。③抗车辙性：能够在高温环境下保持较好的稳定性，能够在一定程度上降低车辙病害的产生。④抗疲劳性能：在反复承受车辆行驶的过程中能够保持其完整性，避免道路出现疲劳损坏[4]。

（2）缺点

①材料成本较高：由于采用了低标号沥青和改性剂，高模量低标号改性沥青混凝土路面的材料成本相对较高，增加道路建设的初期投资。②耐久性问题：在交通量大，重载车辆多的情况下，抗车辙能力不足，不能有效降低灯控路口车辙病害的发生。

（三）NRP 抗车辙混合料

1. 技术原理

NRP 抗车辙混合料路面技术是以干法 SBS 改性技术为基础，引入高强环氧反应型增粘树脂，实现“刚柔复合”的沥青改性效果。干法 SBS 与含有单个环氧基团的有机高分子化合物，通过与多种类型的环保型固化剂在高温激发下发生交联反应而形成不溶、不熔的具有三向网状结构的高聚物。同时，干法 SBS 材料提升沥青混凝土抗水损、抗开裂性能[5]。

2. 优缺点

（1）优点

①沥青胶结料采用干法 SBS 弹性体改性材料和新型单组分环氧的“刚柔复合”改性技术体系，混合料 70℃高温 1.0MPa 苛刻工况下碾压 240 小时“纹丝不动”，对比的改性沥青方案在 10 小时发生 1.5cm 车辙破坏。②经与常规沥青路面改造前后对比，抗车辙混合料的抗车辙效果良好。③施工工艺简单可控，与普通热拌沥青混合料基本相当，无需养生，路表降至 50℃后即可开放交通。④ NRP 抗车辙混合料铺装在高温抗车辙、抗荷载破坏能力做到极致的情况下，还保留了 SBS 改性沥青混凝土的抗水损坏、抗低温开裂等性能。

（2）缺点

①虽然 NRP 抗车辙混合料路面技术在长期内能显著降低生命周期成本，但初期投资可能相对较高。② NRP 抗车辙混合料路面技术在多个项目中表现出了良好的抗车辙性能，但其长期耐久性和稳定性仍需进一步验证。③经现场调查，部分 NRP 抗车辙混合料路面结构表面出现不规则裂缝。

（四）灌入式半柔性复合路面

1. 技术原理

①灌入式半柔性复合路面通过在大空隙的沥青混合料中灌入水泥基灌浆料，实现了刚性和柔性的有机结合。沥青混合料提供了路面的柔性和舒适性，而水泥基灌浆料则增强了路面的强度和稳定性。这种结构使得路面既具有沥青路面的美观舒适性，又具有混凝土路面的强度稳定性[6]。②灌入的水泥基灌浆材料在高温气候条件下可有效禁锢住沥青混合料中集料，防止其发生滑移变形，从而提高路面的抗车辙性能。同时，硬化的水泥胶浆具有较好的密实性，可减少水对沥青混合料的侵入损害。此外，灌入的水泥基灌浆料与沥青混合料基体的骨架结构共同抵抗行车荷载，从而有效减少车辙的发生。③灌入式半柔性复合路面的施工分为两个阶段。第一阶段为摊铺施工，即基体沥青混凝土的铺设阶段，其流程与传统密级配沥青混凝土摊铺基本一致。第二阶段为灌浆施工，这是灌入式半柔性复合路面特有的施工工艺，通过灌浆机械向已摊铺成型的沥青路面中灌入水泥基胶浆浆液。灌浆施工过程主要包括制浆、灌浆、收浆三大工序。

2. 优缺点

（1）优点

①灌入式半柔性复合路面有较强的抵抗高温变形能力，有效提高路面结构的抗车辙性能。②半柔性复合路面具有良好的耐油、耐酸、耐热、耐水等特性，能够延长路面的使用寿命。同时，其抗疲劳性能也较强，能够抵抗重复荷载的作用而不易损坏。③其高温稳定性能、抗疲劳性能大大优于常规沥青混凝土路面，同时，具有耐油、耐酸、和易着色等特性。

（2）缺点

①施工复杂：灌入式半柔性复合路面的施工工艺相对复杂，需要专业设备和人员操作。配合比设计和施工过程需要严格控制，以确保路面质量。

②养护难度大：由于材料组成和结构特性的特殊性，半柔性复合路面的养护需要专业知识和技术。对于局部损坏的路面，需要精确判断损坏原因和范围，并采取相应的修复措施。

③初期建设成本较高：④在高温条件下，沥青和灌浆水泥之间的界面黏附力会降低，不同材料相之间的不协调变形将加剧这种脱粘破坏，从而导致路面开裂。⑤当转弯重载车辆较多时，路面易在转弯车辆荷载作用下发生麻面、松散等病害。

三、路面抗车辙方案的选择

路面抗车辙方案的选择受各种因素如：位置、交通量、工期等影响。

（一）交通量

1. 交通量大、重载车辆占比高时，可以从钢筋混凝土路面、NRP 抗车辙混合料、灌入式半柔性复合路面三种技术中进行选择。转弯交通量较大的平交口时，不建议采用灌入式半柔性复合路面；当对工期有较高要求时，不建议采用钢筋混凝土路面。

2. 交通量不大，或交通量较大但以小型车为主的道路，在有抗车辙需要的灯控路口、监控等路段，可采用高模量低标号改性沥青混凝土，但重载车辆占比较高时，不建议采用。

（二）工期

交叉口是不同道路进行交通转换的重要节点，对平交口进行施工，势必会对交通造成影响，所以平交口改造施工工期越短越好。因此，当对施工工期有要求时，可采用 NRP 抗车辙混合料、灌入式半柔性复合路面、高模量低标号改性沥青混凝土，不建议采用钢筋混凝土路面。

（三）项目建设类型

1. 新建道路

新建道路受交通组织、旧路利用等因素影响小，可根据预测交通量、投资等综合选择抗车辙技术。

2. 旧路改建项目、养护项目

旧路改建及养护项目需要综合考虑交通组织、旧路利用、高程控制等情况，建议从 NRP 抗车辙混合料、灌入式半柔性复合路面、高模量低标号改性沥青混凝土三种技术方案选取。若沥青路面改造为钢筋混凝土路面，需对原路面结构进行挖除新建或抬高旧路，改造时间长，对交通影响大，建议论证采用。

四、效果跟踪检验

对 2016 年我市大中修养护项目中，信号灯路口、限速标志连续制动段前等路段，采用的四种抗车辙路面进行跟踪检测，具体情况如下：

（一）改造为钢筋混凝土路面

改造前（2016 年拍摄）

改造后（2023 年拍摄）

（二）采用高模量改性沥青混凝土路面

选取路段交通量非常大，且重载车辆占比高，占比超 40%，2019 年改造前灯控路口车辙严重，病害较多。改造完成至今已运营 5 年，经现场调查，灯控路口车辙病害严重，其他病害较少。

通过对车辙检测结果的分析，结合建成年限、交通量及高模量低标号沥青混凝土技术特点等，得出以下结论：

1. 在同等条件下，高模量低标号改性沥青混凝土与普通沥青混凝土相比，具有一定的抗车辙能力。

2. 在交通量大，重载车辆多的情况下，其抵抗车辙的能力降低，易发生较严重的车辙病害。

3. 经调查，采用高模量低标号改性沥青混凝土技术的交叉口基本没有裂缝类病害，因此推断，高模量低标号改性沥青混凝土具有一定的抗开裂能力。

4. 高模量低标号改性沥青混凝土技术可用于中等交通或重载车辆较少的重交通道路。

（三）NRP 抗车辙混合料路面

通过对车辙检测结果的分析，结合建成年限、交通量及 NRP 混凝土技术特点等，可知：

1. NRP 抗车辙混合料抗车辙能力较好，适用于交通量大、重载车辆多的灯控路口。

2. NRP 抗车辙混合料易产生面层开裂，需要后期及时进行养护修复。

（四）灌入式半柔性复合路面

通过对车辙检测结果的分析，结合建成年限、交通量及灌入式半柔复合路面技术特点等，得出以下结论：

1. 灌入式半柔性复合路面抗车辙能力强，适用于交通量大、重载车辆多的灯控路口。

2. 当转弯车道重载车辆多，易对路面进行破坏，发生松散、剥离等病害。

3. 灌入式半柔性复合路面易产生面层开裂，需要后期及时进行养护修复。

结语

本文是根据我市普通干线公路大中修工程，对重载车辆在信号灯路口等连续制动产生车辙进行处理，采用的四种抗车辙路面。受施工环境、施工单位水平、交通量及运营时间长短影响，有的路段服役时间较短，部分指标影响因素未充分发挥，跟踪检测结论与评价可能存在一定问题，请同行及专家提出宝贵意见。下一步，将继续跟踪各类型抗车辙路面进行检测，以便更接近实际情况。

参考文献

[1] 就地温拌再生沥青混合料长期抗车辙性能试验分析．朱华阳；崔文杰．黑龙江交通　科技，2024(11)．

[2] 沥青路面抗车辙性能提高策略分析．杨倩．运输经理世界，2023(30)．

[3] 聚酯纤维对提高沥青混合料抗车辙性能研究．张亮．黑龙江交通科技，2016(12)．

[4] 沥青路面抗车辙性能的影响因素分析．张弘．交通世界，2017(16)．

[5] 沥青路面抗车辙性能的改善措施及评价方法．肖桂清；曹立松．山西建筑，2015(29)．