

重载交通下沥青路面早期损坏机理及防治

陈志国

邢台路桥建设集团有限公司 河北 邢台 054001

摘要：重载交通是诱发沥青路面早期损坏的主要因素，极易造成道路通车短期内出现车辙、裂缝、松散、坑槽等病害，严重影响道路通行质量与服役年限。本文以重载路段沥青路面为研究对象，梳理重载交通荷载特征与路面结构受力特性，系统总结各类早期损坏的外观特征与分布规律，从细观层面剖析荷载疲劳、剪切作用、荷载与环境耦合的损坏机理。同时结合工程实际，从事前预防、事后修复、常态化养护等方面提出针对性防治技术。研究成果可为重载干线沥青路面设计、施工与养护工作提供实操参考。

关键词：重载交通；沥青路面；早期损坏机理；防治技术

引言：随着公路货运行业快速发展，矿区道路、物流干线等路段重载、超限车辆通行频次持续增加，沥青路面早期损坏问题愈发突出。多数重载道路在通车数年甚至一年内便出现各类表层及结构性病害，不仅降低行车舒适性与安全性，还大幅增加道路养护成本，造成资源浪费。现阶段针对重载路面早期损坏的机理分析和精准防治体系仍不够完善。为此本文结合路面结构理论与工程病害现状，系统分析早期损坏特征与细观机理，配套完善防治技术措施，为重载路面长效运维提供技术支撑。

1 重载交通与沥青路面结构基础理论

1.1 重载交通的定义与荷载特征

道路工程中，重载交通一般指车辆轴载超过道路设计标准轴载的通行荷载，常见于货运干线、矿区道路及物流通道。现阶段公路货运车辆超载、超限现象普遍，车辆实际轴载往往远超规范设计值。与常规交通荷载相比，重载荷载最显著的特征是压应力数值大、作用集中度高，且车辆启停、变速会产生附加水平剪切力。重载车辆通行频次高、荷载重复作用次数多，会大幅缩短路面结构疲劳寿命，是诱发沥青路面早期病害的核心外部诱因。

1.2 沥青路面典型结构组成与力学特性

常规沥青路面为多层复合结构，自上而下主要分为沥青面层、基层、底基层和路基，各结构层功能分工明确。沥青面层直接承受车辆荷载和环境作用，具备密实、耐磨、抗滑的特点，以柔性变形为主；基层与底基层多采用半刚性材料，主要承担扩散应力、承接荷载的作用，刚度大、整体性强，但抗变形韧性较差。整体路

面结构兼具柔性 with 刚性特征，正常荷载下可通过逐层扩散应力实现稳定受力，但若遭遇超限重载，各结构层受力状态会快速失衡^[1]。

2 重载交通下沥青路面早期损坏类型及特征

2.1 路面车辙病害形态与分布特征

车辙是重载沥青路面最典型的早期结构性病害，常见于通车1至3年的货运干道、收费站及交叉口等重车集中路段，病害规律显著。（1）形态特征：主要表现为行车道轮迹带纵向连续凹槽，路面两侧伴随隆起，重载路段车辙多呈“W”型，沉降均匀且持续发展，不同于普通路面零散的不规则凹陷。（2）分布特征：车辙仅集中在车辆碾压轮迹区域，车道中部及道路两侧非通行区域基本无病害。路段重车通行频次越高、荷载越大，车辙成型速度越快、深度越深，是判定路面重载损伤最直观的危害指标。

2.2 路面裂缝类病害特征

重载荷载反复碾压会诱发多种早期裂缝，不同裂缝形态对应差异化路面损伤状态。（1）纵向裂缝：沿行车方向延伸，集中于轮迹带，裂缝宽度小、连续性好，早期无路面沉陷，仅出现表层开裂，由重载持续挤压、拉伸作用所致。（2）横向裂缝：垂直行车方向均匀分布，多为规则短裂缝，重载路段裂缝数量显著多于常规路段，极易贯通整个车道。（3）网状裂缝：为复合型早期损伤，由纵横细裂缝交织形成，是路面整体受力疲劳的初期表现，若不及时处置，会快速发展为大面积结构性破损。

2.3 路面松散、坑槽、推移表层损坏特征

此类表层局部病害多发生在车辆制动、启停及转弯等重载剪切集中路段。(1)路面松散:表层沥青膜脱落,集料裸露松动,路面密实度降低、粗糙度增加,是混合料粘结性能失效的初期特征。(2)路面坑槽:由松散病害进一步发展形成,局部集料脱落形成不规则凹陷,多零散分布于轮迹带,深浅不一。(3)路面推移:受重载水平剪切力影响,表层混合料沿行车方向滑移、局部隆起,直接破坏路面平整度,影响行车舒适度与安全性。

2.4 基层隐性早期损坏外在表现特征

基层早期损伤属于隐性病害,初期无明显表层破损,仅通过路面细微变化体现,极易被忽视。(1)不均匀微沉陷:路面无裂缝但局部轻微下沉,平整度下降、行车颠簸,主要因重载造成基层、底基层压实度衰减。(2)裂缝伴生沉陷:裂缝两侧出现高低差,区别于普通表层裂缝,代表基层已出现结构性微损伤。(3)病害扩散性强:基层隐性损伤初期范围较小,在持续重载碾压下会快速扩散,逐步诱发大面积车辙、裂缝及坑槽,是路面结构性损坏的重要前兆^[2]。

3 重载交通下沥青路面早期损坏细观机理分析

3.1 重载反复荷载下混合料疲劳损伤机理

沥青混合料属于粘弹性复合材料,由沥青胶浆、粗细集料、空隙共同组成,在重载反复循环荷载作用下会产生渐进式细观疲劳损伤,是路面早期损坏的核心诱因。(1)胶浆界面损伤:重载反复碾压会使沥青胶浆与集料接触面持续承受拉压交替应力,界面粘结键逐步产生细微剥离裂隙,初期裂隙尺寸微小、分布零散,肉眼无法识别,仅破坏混合料局部粘结整体性。(2)内部空隙演化:混合料原生微小空隙在循环荷载挤压、拉伸作用下不断扩张、贯通,空隙率持续增大,混合料密实度逐步衰减,结构内部形成连续损伤通道。(3)疲劳累积失效:重载荷载远超设计标准,荷载循环次数大幅缩减材料疲劳寿命,细微损伤持续累积,无自愈空间,最终从内部细观损伤发展为表层开裂、松散等宏观病害。

3.2 竖向高压应力引发车辙永久变形机理

重载车辆产生的超高竖向压应力,是沥青路面轮迹带车辙形成的直接细观诱因,区别于常规荷载下的弹性变形。(1)集料重排滑移:竖向高压应力作用下,沥青混合料内部集料颗粒受力失衡,颗粒间原有嵌挤结构被破坏,粗集料发生竖向沉降、横向滑移,颗粒排列方式重塑,产生不可恢复的结构性变形。(2)沥青胶浆流动:高温环境叠加重载高压,沥青胶浆粘度降低、流动

性增强,在轮载挤压下向混合料空隙及两侧区域流动聚集,轮迹带区域胶浆流失、集料裸露,两侧混合料堆积隆起。(3)塑性变形累积:每一次重载碾压都会产生微量塑性残余变形,反复作用下变形持续叠加,逐步形成稳定的纵向轮迹凹槽,最终形成永久性车辙病害。

3.3 剪切应力作用下路面推移、开裂损坏机理

车辆制动、启停、转弯过程中,重载荷载会产生显著水平剪切应力,造成沥青路面细观剪切损伤,诱发推移、剪切开裂等病害。(1)表层剪切错位:水平剪切应力集中于沥青面层表层,使表层混合料与下层结构产生相对剪切错位,混合料内部颗粒间摩擦力不足以抵抗剪切作用,出现层间分离、材料滑移。(2)剪切裂隙萌生扩展:剪切应力持续作用下,混合料内部产生斜向细微裂隙,裂隙沿剪切面逐步延伸、贯通,形成规则剪切裂缝,多分布于交叉口、收费站等变速路段。(3)表层结构推移隆起:大量重载车辆反复剪切碾压,滑移的混合料不断堆积,路面表层出现局部隆起、推移变形,路面平整度破坏,同时裂隙持续扩张,逐步发展为贯通性破损。

3.4 荷载与环境耦合作用下加速损坏机理

重载荷载与温湿度、雨水等环境因素形成耦合效应,会加剧路面细观损伤演化速度,大幅缩短路面早期损坏周期。(1)高温-荷载耦合:夏季高温使沥青软化、混合料整体刚度下降,抗变形能力大幅降低,重载碾压下更易出现集料滑移、胶浆流动,加速车辙变形发展。(2)低温-荷载耦合:冬季低温导致沥青脆性增强,混合料抗裂性能下降,重载应力作用下,内部细微裂隙极易快速扩张,诱发低温开裂。(3)水-荷载耦合:雨水渗入路面内部空隙后,重载碾压会产生动水压力,持续冲刷沥青集料界面,加剧界面剥离,导致混合料松散、坑槽快速形成,实现细观损伤的加速演化^[3]。

4 重载沥青路面早期损坏防治技术

4.1 重载沥青路面早期损坏预防技术措施

针对重载交通沥青路面频发的车辙、开裂、松散等早期病害,防治预防主要从以下四个方面开展。(1)优化重载适配型沥青混合料配比。普通沥青混合料抗剪、抗变形能力难以适应重载反复碾压,是路面早期损坏的主要材料诱因。重载路段优先采用改性沥青或高标号硬质沥青,增强沥青胶浆粘结强度和高温稳定性,避免高温荷载作用下胶浆流变失效。集料选用压碎值低、棱角性好、质地坚硬的玄武岩或石灰岩,通过优化级配形成骨架嵌挤结构,显著提升混合料抗碾压和抗滑移性能。

同时合理控制表层空隙率,减少雨水渗入通道,减轻荷载与水耦合损伤,并严格管控拌合温度与拌合时长,保证混合料整体均匀性。(2)改良重载路面结构设计方案。常规路面结构厚度和组合形式难以满足长期重载通行要求。货运主干道、重载通行路段可适当增加沥青面层厚度,通过分层摊铺压实提升整体刚度与变形抵抗能力。基层选用高强度、整体性优的半刚性材料,提高应力扩散效果,防止基层隐性损伤引发路面沉陷、开裂。同步优化层间连接工艺,通过喷洒粘层油、增设应力吸收层等方式强化层间粘结,避免重载剪切作用造成的层间剥离和路面推移病害。(3)强化施工现场精细化质量管控。施工质量缺陷会大幅降低路面重载适应性,诱发各类早期病害。摊铺过程保持匀速连续作业,避免混合料离析、摊铺厚度不均等问题。碾压严格遵循“先轻后重、先慢后快”施工原则,合理匹配碾压设备与碾压次数,重点加强轮迹带、交叉口、道路衔接段等受力集中区域的压实控制,确保压实度满足重载路段标准。路面成型后严格执行封闭养护制度,禁止车辆提前通行造成初期塑性变形。(4)构建重载交通常态化管控机制。超载超限是路面早期损坏的主要外部诱因,需通过交通管控实现源头防治。在重载路段设置超限检测点位,严格管控车辆轴载,杜绝超限车辆通行。根据车流特征划分重载专用车道,分散集中荷载,避免单车道长期超负荷受力^[4]。

4.2 重载沥青路面早期病害处置与修复技术

重载沥青路面早期病害具有损伤轻、范围小、扩散速度快的特点,及时开展微创修复和针对性处置,可有效阻断病害发展,避免轻微破损演变为结构性病害。早期修复以快速处置、精准修补、结构补强和预防性养护为核心,在保障通行的前提下提升路面耐久性能。(1)轻微表层病害快速修复技术。针对宽度 3mm 以内细微裂缝,采用专业灌缝胶灌注修复,清理、烘干缝隙后填充弹性材料,封闭渗水通道,抑制裂缝继续扩展。对于表层松散、集料裸露路段,采用微表处、稀浆封层技术进行薄层修复,恢复路面密实度、平整度及抗滑性能,无需大面积破除原有路面,施工效率高、交通干扰小,适用于各类轻微表层损伤处置。(2)典型局部病害精准处置技术。针对深度 15mm 以内的浅层车辙,采用局部热铣刨重铺工艺,清理轮迹带疲劳软化混合料,重新摊铺压实改性沥青混合料,恢复路面平整度。对于零散

小型坑槽病害,采用冷补沥青材料修补,彻底清除坑内松散废料、涂刷粘层油,分层填充夯实,保证修补区域与原路面紧密衔接,有效解决局部破损问题,防止病害持续扩大。(3)局部结构损伤补强修复技术。针对基层轻微受损、路面局部微沉陷等早期结构性病害,采用钻孔注浆补强工艺,通过高压注浆填充基层内部空隙,固结松散基材,恢复基层整体刚度和承载能力。对于层间粘结失效、路面推移路段,铣刨破损面层,增设应力吸收层后重新铺筑面层,强化层间整体性,从结构层面解决重载剪切引发的变形破损问题。(4)常态化预防性养护技术。建立定期路面巡检机制,及时排查微细裂缝、松散、局部沉陷等早期隐患,实现病害早发现、早处置。根据路段重载通行强度,定期开展雾封层、碎石封层等养护作业,补充路面沥青膜,提升表层防水、耐磨、抗剪切性能。结合季节特点开展针对性养护,夏季防控高温车辙,冬季处置低温裂缝,雨季及时修补破损点位,形成规范化、常态化养护体系,有效延缓路面老化衰变^[5]。

结束语: 本文系统阐述了重载交通条件下沥青路面的受力变形特点,明确了车辙、裂缝、松散、基层隐性损伤等早期病害的具体特征,揭示了疲劳损伤、剪切变形、环境耦合作用下的细观损坏机制。结合工程实际从材料、结构、施工、交通管控及病害修复养护多个维度,建立了完整的路面早期损坏防治体系。研究清晰阐明了重载路面早期损坏的发展规律,能够有效改善重载路段路面养护针对性不足的问题,对提升重载道路耐久性具有实际工程价值。

参考文献

- [1] 胡兵. 重载交通下公路沥青路面车辙防治策略研究 [J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2026(2):029-032.
- [2] 宋霞,苏本林. 高速公路沥青路面早期损坏分析与防治对策 [J]. 华东科技(综合),2021(5):185-185.
- [3] 张露萍,戴钧翔. 高速公路沥青混凝土路面裂缝产生原因及防治措施 [J]. 中国水泥,2026(4):98-100.
- [4] 刘少青. 重载交通下沥青路面车辙病害成因及综合防治措施 [J]. 中国科技期刊数据库工业 B,2026(1):047-050.
- [5] 吴曼,马萍. 重载交通作用下市政道路沥青路面病害机理与处治技术优化 [J]. 奥秘,2026(14):121-123.