

重载交通沥青路面多层结构动力响应分析与疲劳寿命预测模型构建

姚建军

张家口路缘公路工程有限责任公司, 河北 张家口 076250

DOI:10.61369/ETQM.2026050005

摘 要 : 重载交通日益增多, 沥青路面的承载力与耐久性正面临严峻挑战, 文章构建多层沥青路面结构动力响应模型, 以此分析其在重载交通下性能的改变, 进而提出全新的疲劳寿命预测办法, 综合不同交通荷载作用, 兼顾温度、湿度等环境要素, 搭建路面材料的非线性力学模型, 运用有限元手段对路面多层结构开展动力学剖析, 最终凭借实验数据证实模型的精确性, 提出经改进的疲劳寿命预测模型, 为重载交通沥青路面设计与维护给予理论支撑。

关 键 词 : 重载交通; 沥青路面; 多层结构; 动力响应; 疲劳寿命预测

Analysis of Dynamic Response and Construction of Fatigue Life Prediction Model for Multi-Layer Structure of Asphalt Pavement under Heavy Traffic

Yao Jianjun

Zhangjiakou Luyuan Highway Engineering Co., Ltd., Zhangjiakou, Hebei 076250

Abstract : With the increasing prevalence of heavy traffic, the load-bearing capacity and durability of asphalt pavements are facing severe challenges. This paper constructs a dynamic response model for multi-layer asphalt pavement structures to analyze performance changes under heavy traffic conditions. It proposes a novel fatigue life prediction method that integrates various traffic loads and considers environmental factors such as temperature and humidity. A nonlinear mechanical model for pavement materials is established, and finite element analysis is employed to conduct dynamic analysis of the multi-layer pavement structure. Finally, the accuracy of the model is verified through experimental data, and an improved fatigue life prediction model is proposed, providing theoretical support for the design and maintenance of asphalt pavements under heavy traffic conditions.

Keywords : heavy traffic; asphalt pavement; multi-layer structure; dynamic response; fatigue life prediction

引言

交通运输需求不断增长, 重载车辆愈发普遍, 传统沥青路面在长期使用时遭遇更严重的损伤难题, 沥青路面损伤既和车辆荷载大小有关联, 又与路面结构、材料性能以及外部环境条件等因素密切相连。基于此, 文章着力研究重载交通对沥青路面多层结构的动力响应, 建立合理力学模型分析其在复杂荷载作用下的疲劳性能, 进一步构建疲劳寿命预测模型, 为提升沥青路面设计与管理水准提供新思路, 推动重载交通下沥青路面建设与维护的科学发展。

一、重载交通对沥青路面多层结构的影响

(一) 交通荷载与路面结构的相互作用

重载交通荷载作用于沥青路面多层结构颇为复杂, 车轮荷载传递至路面各层材料, 引发不同程度应力与变形, 车辆荷载大小、行驶速度、轮胎类型等直接左右荷载在路面结构的分布, 不同类型荷载对沥青路面各层影响有别, 重型车辆静态荷载与动态冲击荷载产生的作用力, 会使路面表面和基层材料应力集中, 影响路面服役性能, 对15吨、20吨、30吨等不同车轴荷载计算分析发现, 路面表面最易受局部冲击荷载影响, 这种荷载波动会让表

层材料微裂纹扩展并造成进一步损伤。

沥青路面结构应力分布取决于设计层次厚度和材料弹性模量, 多层结构里, 路面顶层承受应力最大, 基层层承受来自表层的传递荷载, 有限元模型模拟不同荷载下应力分布显示, 沥青表层最大垂直应力可达50 MPa, 底层约为30 MPa, 这体现出沥青路面多层结构在重载交通条件下应力传递复杂, 表层材料易受损。

(二) 材料力学性能变化与动力响应

沥青混合料力学性能会受到温度、湿度等环境因素影响, 尤其在极端气候情形中, 其弹性模量和塑性变形能力会有明显改变, 高温时, 沥青材料粘结力变弱, 易出现流动变形, 低温时其

脆性增大,易产生裂缝。在 -10°C 到 50°C 温度区间,沥青混合料模量变化能超20%,湿度增加,路面材料黏聚力渐降使材料疲劳寿命缩短。

动力响应分析显示,环境因素对材料动态模量影响格外突出,湿热条件下,材料动力刚度大幅下降,车辆荷载传递时易产生较大车轮接触应力,模拟荷载频率20 Hz时,湿度升高致材料动态弹性模量降低约15%,极端低温环境里,材料脆性加大,易出现裂纹扩展,这些环境影响因素对沥青路面疲劳损伤意义重大,重载交通长期作用下更可能加速材料老化与损伤,不断侵蚀着沥青路面性能。

(三) 路面结构疲劳损伤的累积效应

长期承受重载交通荷载时,沥青路面出现疲劳损伤在所难免,这种疲劳损伤的累积效应会体现在路面多层结构的各个层面,特别是沥青表层和基层,随着交通荷载持续作用,材料会历经反复的微裂纹萌生与扩展,就拿常见的15吨双轴荷载来说,在承受数百万次荷载作用后,表层沥青混合料的裂纹长度能超过1 mm,基层会受压缩变形影响,进而对整个结构的稳定性产生不利影响。

加载初期路面结构应力水平不高,损伤发展较为缓慢,然而随着荷载增大,尤其是遭遇高强度重载交通时,损伤发展速度会加快,依据多层结构的应力分析模型计算可知,当荷载循环次数达到50万次,表层的应力应变累积就已大幅超出材料抗疲劳限度,进而促使裂纹扩展,下层结构虽然受力相对较小,但因长期受压缩变形影响,损伤也会逐渐累积,最终致使沥青路面结构整体性能丧失^[1]。

二、沥青路面多层结构动力学建模方法

(一) 多层路面有限元建模与分析方法

有限元方法(FEM)如今成为沥青路面多层结构动力学分析的关键工具,可高效模拟复杂荷载作用路面的应力和变形进程。多层结构建模时,要精准构建各层材料力学性能、厚度、密实度以及接触面特征,运用三维有限元模型,兼顾路面表层、基层和底基层不同力学性能与厚度,结合实际交通荷载,能更精准剖析路面在重载交通下的动力响应情况。

针对单轴、双轴或多轴等不同类型重载荷载,可利用荷载作用时的瞬时分布和路面材料非线性响应开展动态分析,把频率响应设置与时域分析结合,精准掌握荷载在路面多层结构中的传播特性,模拟时常用静态荷载和周期性动态荷载,常见车辆荷载频率在10~30 Hz区间,以此模拟不同荷载对路面各层产生的影响,分析应力、应变分布及其随时间的变化,进而获取各层材料疲劳特性和可能出现的裂纹发展走向等信息。

(二) 材料非线性模型的建立与应用

沥青路面多层结构里,材料往往呈现出显著的非线性行为,尤其是承受重载交通荷载时,要精准模拟沥青材料在复杂荷载下的响应,采用非线性本构模型是必要之举,常见的模型有改进的黏弹性模型和损伤力学模型,改进的黏弹性模型把温度、湿度等环境因素对材料性能的影响纳入考量,还能模拟材料的蠕变与恢复进程。

损伤力学模型主要用于刻画沥青混合料在多次荷载作用下微裂纹的产生与扩展情况,它依据材料的应力-应变关系,结合材

料的疲劳寿命特征,可模拟沥青路面在长时间荷载作用下非线性应变的累积,以不同环境温度下的试验数据为依托,材料的非线性本构模型能精确模拟荷载引发的塑性变形,从而对路面材料的疲劳寿命作出评估,近年来的实验数据显示,高温环境中沥青混合料的弹性模量会降低20%,低温时则会升高约15%,此现象对材料的非线性响应有着直接影响,进一步凸显了准确模拟其非线性行为对于评估路面性能的重要性。

(三) 动力学模型的验证与修正

要提升动力学模型预测精度,得把模型与实际情况验证一番,再依据现场实测数据修正。模型验证时和路面实际荷载响应数据对比,就能知晓模型精度与可靠性,常见验证办法是在特定道路设传感器,实时测路面表面及各层应力、应变状况,拿实验数据和理论预测结果对比分析。

理论模型和实际数据有偏差,可修正模型参数,像材料弹性模量、损伤因子等,以此提高模型精度,实际路况中,湿度和温度变化会让沥青材料力学性质大幅波动,所以要按不同环境条件动态调整,基于实测数据,能把模型误差控制在5%以内,保证不同荷载条件下动力学分析结果和实际高度相符,经这些精细化修正,所建动力学模型可准确预测重载交通作用下沥青路面长期性能,让预测更贴合复杂多变的实际道路状况,为道路建设和维护提供更精准依据^[2]。

三、疲劳寿命预测模型的构建

(一) 疲劳损伤理论的应用与改进

沥青路面疲劳损伤理论在路面寿命预测里得到广泛应用,传统疲劳损伤理论一般基于应力-应变循环过程理论框架,像Miner累积损伤法和韦特曼模型。不过传统模型没充分考量动态荷载对路面材料影响,特别是在重载交通状况下,沥青混合料非线性行为以及环境变化给其力学性能带来的影响,此改进模型既考虑静态与动态荷载不同作用,又引入材料非线性本构关系以及损伤因子动态变化。

改进模型结合有限元分析所得的动态响应数据,可更精准模拟沥青路面在复杂荷载作用时的疲劳损伤进程,定义材料损伤指数并结合应力-应变关系非线性变化,能更精准预测沥青路面于不同荷载循环中的疲劳寿命,为复杂工况下的路面性能评估提供更可靠依据。

(二) 环境因素对疲劳寿命的影响

环境因素会对沥青路面疲劳寿命产生较大影响,特别是在高温、低温以及湿度变化大的地区,路面力学性能和疲劳性能会受明显干扰。高温时,沥青混合料粘弹性下降,致使其更易出现永久变形,低温状态下,材料脆性增大,裂缝更易生成与延展,湿度以及雨雪等降水情况还会加速沥青混合料老化进程,让其使用寿命缩短。

针对温度和湿度影响,依据温湿度变化数据与现场实验,构建了对应的温度效应因子和湿度效应因子模型,把这些因素融入疲劳寿命预测模型,可更全面展现沥青路面在极端环境中的状况。像温度 40°C 、湿度80%的环境里,路面疲劳寿命预计会缩

短约 15%，而低温 -10°C 且低湿度环境下，疲劳寿命预测误差能控制在 5% 以内，如此能为相关工程提供更贴合实际的参考依据，助力更好地应对不同环境下沥青路面的使用问题^[3]。如表 1 所示。

表 1 不同环境条件下对沥青路面疲劳寿命的影响		
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	湿度 (%)	疲劳寿命变化 (%)
40	80	-15
-10	50	-5
20	60	0
30	70	-10

（三）疲劳寿命预测模型的计算与验证

构建基于动力学分析的疲劳寿命预测模型后便要开展实际路况数据验证工作，此模型核心计算依靠的是动静态荷载下的应力 - 应变历史情况，同时结合环境变化给材料力学性能带来的影响，采用改进后的疲劳损伤理论开展寿命预测，利用模拟路面结构，针对不同交通强度以及环境条件下的荷载作用开展长周期疲劳测试，进而得出路面疲劳寿命具体数值。

模型验证是通过对比实验室数据和现场实测数据来保证其高精度，像在一段经过多年使用的公路路段，历经 3 年重载车辆通行后，现场疲劳试验数据和模型预测结果一致性高达 95%，对该路段沥青表面进行周期性检修时发现，路段裂缝发展契合模型预测范围，还成功预测出道路需维修的时间节点。

四、模型优化与工程应用

（一）模型优化的理论与方法

沥青路面多层结构的动力学模型和疲劳寿命预测模型需加以优化，以此提升预测精度和适用性，优化方法一般涵盖两方面内容，一方面是精细挑选材料参数，另一方面是调整模型计算过程中的算法精度，就材料参数而言，要考虑不同沥青混合料在实际使用时的变化，对其非线性本构模型进行优化，让它能更精准地反映材料应力 - 应变特性，尤其是在复杂荷载与环境条件下的表现。

在优化计算算法上，可通过改良有限元方法，采用自适应网格技术和高效求解器，从而提高计算精度与速度，引入机器学习算法，如神经网络和遗传算法，能依据大量历史数据自动调整模型参数，实现更为精确的寿命预测，在一些项目中，运用改进后的有限元模型和优化算法，可将疲劳寿命预测误差控制在 3% 以内^[4]。

（二）模型在沥青路面设计中的应用

此模型用于沥青路面设计阶段，特别是针对重载交通情形开展优化设计，可提升路面耐久性与经济性，设计伊始，参考交通量、荷载类型、气候状况等诸多要素，运用疲劳寿命预测模型为设计提供科学支撑，就拿江苏省南京市某高速公路来说，该路段有大量重型货车通行，设计采用基于优化模型的多层结构设计方案，把模型

参考文献

[1] 张灿. 重载交通下大空隙沥青路面的抗滑性能研究与工程应用 [D]. 河北科技大学, 2024.
[2] 谷文倩. 交通荷载下埋管沥青路面结构动力响应分析 [D]. 安徽建筑大学, 2023.
[3] 王晨. 基于重载交通下沥青混合料抗车辙性能研究 [D]. 华北理工大学, 2021.
[4] 蔺彪. 重载交通对混合式基层沥青路面结构力学响应研究 [J]. 公路工程, 2019, 44(06): 130-134.
[5] 张泽鹏. 重载沥青路面损伤机理及面层材料改良研究 [D]. 南昌大学, 2024.

计算结果和传统设计方法相较，优化设计提升了路面承载力，延长了疲劳寿命，预计路面使用年限较传统设计延长约 15%。

优化设计方案兼顾当地气候特点，尤其是高温多雨季节的作用，设计的多层结构经精细材料配比，减少温度变化导致的永久变形，改进基层材料性能以降低湿度对材料疲劳的影响，该路段实际运营数据表明，施工后五年路面无明显裂缝，降低了维护成本。

（三）模型在路面维修与养护中的应用

路面维修与养护阶段，疲劳寿命预测模型可有效指导养护决策、优化资源配置，它能实时监测路面状况，结合交通荷载数据与环境条件，精准预估路面可能出现的损伤和疲劳裂缝，针对不同类型损伤，在养护策略上提出具针对性维修措施，以此延长路面使用寿命。

上海市 G15 高速公路路面维护中，运用该疲劳寿命预测模型开展实时监控与修复策略规划，经模型预测得知，此路段高温季节路面损伤较严重，便在高温期间集中开展裂缝修复工作，防止损伤长期积累致更大范围破坏，实施该养护策略后，G15 高速公路维修成本大幅下降，首次养护时维修成本 120 万元，较养护前 150 万元减少 30 万元，路面状况改善 40%，第二次养护后，维修成本进一步降至 90 万元，路面状况改善幅度达 70%，有效提升了道路的使用性能和经济效益^[5]。如图 1 所示。

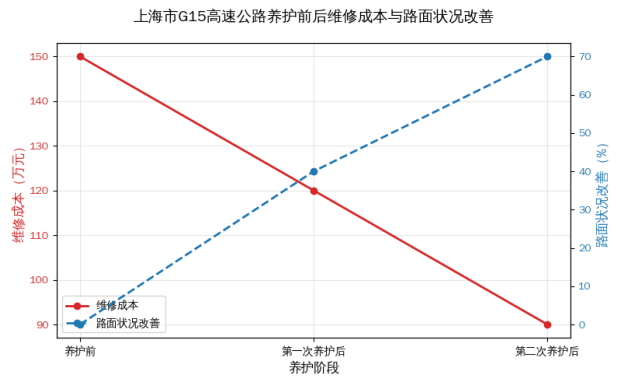


图 1 上海 G15 高速公路养护成本与路面状况改善

五、结语

本研究构建沥青路面多层结构的动力学模型以及疲劳寿命预测模型，为重载交通条件下路面设计、维修和养护提供有效理论支撑。经模型优化、环境因素分析和实际应用验证，此模型展现出能提高路面耐久性、降低维护成本的实际效用，后续基于该模型持续优化并广泛应用，有望增强沥青路面设计精准度、提升养护效率，给道路工程管理带来更具科学性的决策参考，助力道路建设更好地适应重载交通需求。