

沥青路面材料性能与耐久性研究

陈伟 陈平奥

武汉综合交通研究院有限公司, 湖北 武汉 430000

[摘要]沥青路面是高等级公路的主要结构形式,路面材料及其抗疲劳能力决定着公路的服务年限以及维修费用水平,文章对沥青路面材料组成、力学性能、耐久性劣化机制和改善措施进行了系统的研究。材料组成方面,对采用的黏结剂种类及其技术指标、集料性质与级配设计理念;力学性能方面,分析了高温稳定性和水稳定性等重要力学特性;耐久性劣化机理方面,从材料组成和老化过程两个角度阐释了性能衰退原因;耐久性改进方法方面,提出高性能改性沥青技术和抗车辙和抗裂同步提高的方法。根据研究,沥青老化就是轻质成分汽化以及大分子聚合及胶粒不稳定发生的一系列化学反应的过程,高性能改性的沥青材料能够通过构建三维网状结构来大幅提高其耐久度;文章的研究可以给长寿命的沥青路面材料的设计以及性能改善给出一定参考。

[关键词]沥青路面;材料性能;耐久性;老化机理;改性沥青

DOI: 10.33142/ect.v4i3.19420

中图分类号: U414

文献标识码: A

Research on the Performance and Durability of Asphalt Pavement Materials

CHEN Wei, CHEN Pingao

Wuhan Comprehensive Transportation Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract: Asphalt pavement is the main structural form of high-grade highways, and the pavement materials and their fatigue resistance determine the service life and maintenance cost level of the highway. This article systematically studies the composition, mechanical properties, durability degradation mechanism, and improvement measures of asphalt pavement materials. In terms of material composition, the types of binders used and their technical indicators, aggregate properties, and grading design concepts; In terms of mechanical properties, important mechanical characteristics such as high temperature stability and water stability were analyzed; In terms of durability degradation mechanism, the reasons for performance degradation were explained from the perspectives of material composition and aging process; In terms of durability improvement methods, high-performance modified asphalt technology and synchronous improvement of rutting resistance and crack resistance are proposed. According to research, asphalt aging is a series of chemical reactions that occur during the vaporization of light components, polymerization of large molecules, and instability of rubber particles. High performance modified asphalt materials can significantly improve their durability by constructing a three-dimensional network structure; The research in this article can provide some reference for the design and performance improvement of long-life asphalt pavement materials.

Keywords: asphalt pavement; material properties; durability; aging mechanism; modified asphalt

引言

沥青路面以其出色的使用性能以及施工方便等特点,是我国高速公路、城市道路和飞机场跑道的主要结构构造形式之一。但是在长期服务期间也会出现高温车辙,低温裂缝,水分损害,疲劳断裂等情况,严重危害着车辆行驶的安全性和路面寿命。同时随着交通荷载量增大、气候变化愈加恶劣等问题,提高沥青路面材料性能及耐久度是目前急需突破的技术瓶颈。沥青路面材料性能及耐久度的研究涵盖材料学、道路工程、化学分析等多个方面。近年来,国内国际学者在沥青结合料改良工艺、混合料力学性能检测、老化机制以及再生应用等都有了诸多的研究成果。但是,由材料组成至其力学性质再到其演变规律及其改善手段之间的全过程的研究还未成体系。本文总结目前的相关研究成果,全面介绍沥青路面材料组成及性能基础、力学性能及检测方法、耐久性变化规律及改善方法等内容,为

高性能、长寿命沥青路面材料的设计奠定理论基础。

1 沥青路面材料组成与性能基础

1.1 沥青结合料类型与技术指标

沥青结合料作为沥青混凝土最主要的黏结材料,对整个路面结构的使用性质有着决定性的效果。按其来源以及加工方法的不同,沥青结合料主要有:道路石油沥青、SBS改性沥青、橡胶沥青、高黏度改性沥青以及复合改性沥青等几大类,不同种类的沥青结合料在技术和使用效果上都各不相同。

针对三种沥青结合料的基本性能及其混合料的流动性、高温稳定性和疲劳耐久性的试验对比研究,在此基础上对它们性能特点进行分析。通过试验发现:浇注式沥青混合料性能与它的黏结剂种类相吻合,用聚合物复合改性的沥青制成的混合料整体性能较好,比如当温度升至70℃时,这种混合料的静态贯入度比另外两种混合料要小

9.0%，28.4%；在低温条件下弯拉极限应变分别比湖沥青复合改性沥青、硬质沥青改性沥青高 22.8%、60.2%；在 600 $\mu\epsilon$ 控制条件下四点弯曲疲劳寿命，聚合物复合改性沥青大于 100 万次，湖沥青复合改性沥青约为 32.5 万次，硬质沥青改性沥青一加荷就破坏。

表 1 常见沥青结合料类型与技术指标对比

沥青类型	主要技术指标	关键特点	典型应用场景
道路石油沥青	针入度、软化点、延度	基础结合料，性能均衡	普通公路、基层
SBS 改性沥青	针入度、软化点、5 $^{\circ}\text{C}$ 延度、弹性恢复	高温与低温性能均衡	高速公路、重载交通
橡胶沥青	针入度、软化点、黏度	抗老化性能优异、降噪	应力吸收层、磨耗层
高黏度改性沥青	60 $^{\circ}\text{C}$ 黏度、韧性、粘韧性	粘结强度高、抗水损害	透水路面、桥面铺装
复合改性沥青	综合指标	多性能协同提升	特殊路段、长寿命路面

1.2 集料特性与级配设计原理

集料占沥青混合料总体积的 90%以上，其自身的特点以及级配混合料的技术性能起着主导作用。集料性质包括岩石种类、压碎值、磨耗值、针片状含量以及与沥青的黏附性等各项指标，好的石料应该有足够的强度、较锋利的边缘形状和平滑外表，使混合料有足够的骨架支撑力，级配的设计是制备沥青混合料的关键步骤，按矿质集料粒径的不同，分为连续级配、间断级配及开级配三种基本类型，连续级配 AC 型混合料易于施工且有较好的密度，间断级配 SMA 型混合料构造紧密，既有较好的高温稳定又有良好的耐久性，开级配 GFC 型混合料抗水损害能力强，适用于各种交通条件下的路面基层或底基层。开级配 OGFC 等，以高孔隙率，良好的排水性为主要特点。级配的设计难点是如何协调好集料骨架嵌挤力及孔隙率之间的关系，通过对关键筛孔的通过率进行控制达到调节使用性能的目的。

2 沥青路面材料力学行为与性能评价

2.1 高温稳定性与抗车辙性能

高温稳定性是对沥青路面抵抗变形的重要衡量标准。车辙是最典型的高温病害，最明显的表现形式就是轮迹带出现下沉以及两侧鼓包现象，严重影响行车安全性和耐久性。本文通过力学分析及材料学方面，对车辙产生原因进行系统的分析得出剪力集中作用大、材料高温稳定性差和超负荷为主要因素。在研究中建议通过改善路面结构来减小剪力峰值，使用高粘度改性沥青及骨架密实集料增加抗变形性能，增强层间粘结力及压实质量。试验表明：通过综合运用剪应力控制指标与高抗车辙材料可以使动稳度提高 1 倍以上，有效遏制车辙的发展速度。说明全方位的防护措施是保证道路长久服役的根本。车辙性能检测主要运用室内车辙试验，动稳度是其主要检测项目。而汉堡车辙试验可以综合检测混合料的高温抗车辙能力及水稳

定性。对于重载交通区域，使用高模量沥青混合料增加材料的模量数值则能在很大程度上缓解荷载应力对路面造成的影响从而降低路面累积性形变程度。选择 3 种不同的高模量材料，在各自的最佳掺入比例上配置出高模量改性沥青，比较三种沥青结合料以及 SBS 改性沥青的各项技术指标试验结果后，进行沥青混合料组成设计，并以此来评定出高模量沥青混合料的高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性和动态模量等使用性能。

2.2 水稳定性与抗剥落性能

水稳定性是沥青混合料抵抗水损坏的能力，水损坏主要是指沥青膜从集料表面剥离下来，造成混合料粘结强度降低，从而出现松散、坑槽等现象。其影响因素有沥青对集料的黏附能力以及混合料空隙率还有周围环境湿度等。评价方法主要有浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验还有浸水汉堡车辙试验。为能较客观地评估抗剥落剂对含盐高湿条件下沥青混合料水稳定性的影响，在抗剥落剂 PA-1、AMR 及 TJ-066 基础上，利用 SBS-8000 型沥青与集料黏附性测试仪确定抗剥落剂的最佳掺量，在不同的温度下开展掺抗剥落剂的沥青混合料浸水汉堡车辙试验并探讨了浸水汉堡车辙试验的试验条件及评价指标。通过研究发现：在含盐高湿度环境下抗剥落剂的最佳掺量略微大一些些相比淡水环境，分别为沥青用量的 0.4%、0.5%、0.5%；选择 50 $^{\circ}\text{C}$ 时浸水汉堡车辙试验较好地评估了三种不同抗剥落剂对沥青混合料水稳定性的影响。改善沥青混合料水稳定性方法主要有掺加抗剥落剂以及加入消石灰等碱性填充材料、改性沥青的应用和掌握好混合料空隙率等。

3 沥青路面耐久性演化机理与关键影响因素

3.1 材料组成对耐久性的控制作用

沥青路面耐久性指的是在长期服役条件下抵抗各种环境作用、车轮荷载等引起的破坏而维持其结构完整性及使用性能的能力。材料本身性质决定了路面结构的耐久性，即沥青结合料种类的选择，矿质集料的组成比例选择，添加剂的运用以及混合料内部结构特点等。沥青结合料胶体结构稳定程度将影响到混合料的老化性能^[1]。传统的聚合物乳液改性和沥青通过机械混合的方式进行改性，在施工阶段会出现分离、相溶性不好以及储存稳定性差的现象等，相比之下聚氨酯预聚物含有丰富的特征基团异氰酸酯基，有着很强的活性，可以与沥青生成三维网状结构，有利于制备出高品质的改性沥青。级配特点：骨架密实型混合料骨架由粗集料嵌挤而成，细集料及沥青胶浆填充孔隙，可以较好地提高混合料抗荷载加环境联合作用的能力。

3.2 老化行为与长期性能演变规律

沥青的老化是造成路面持久强度降低的主要因素之一。它属于有机物类，沥青在使用过程中会受热、氧、紫外线等外界环境的影响，会引发一系列的化学及物理的变化，使得材料的质量不断地降低^[2]。沥青本身是非常容易老化的，在一定程度上缩短了沥青基质材料的持久寿命，进而提升了其全生命成本以及排放物。为了明确沥青材料

的老化进程以及有针对性的设计出有效的抑制老化和修复的方法来延长其使用寿命。因此研究者们就针对沥青老化过程中的化学反应原理展开总结分析,并将这些原理同化学结构与外界环境进行关联。高黏改性沥青是保证透水路路面结构耐久性的主要材料之一,由于长期使用容易老化影响路面质量。通过对三种常见的高黏改性沥青 SBS 型、复合橡胶型及 TPS 高粘度改性沥青做多个周期的老化实验探究发现,使用荧光显微观察、傅里叶变换红外光谱、凝胶渗透色谱以及薄层色谱-氢火焰离子化检测等方法对高黏改性沥青老化机理进行了全面系统的解析。结果显示三类高粘度沥青都有相似的老化进程即轻质成分蒸发、重质成分累积、凝聚态失稳等;老化程度及其敏感性与所使用的改性材料有关。沥青老化过程中重要反应途径已经明确,即为氧夺氢反应,环烷烃芳构化、含氧官能团生成等。老化所引发的反应使得沥青分子化学结构发生了很大改变从而使分子之间的作用力、分子极性和分子面上所带电荷分布都发生了变化,从而改变沥青分子之间的聚集趋势以及沥青组分之间的相容性,从而影响沥青材料的宏观性质,随着老化程度增加,沥青变硬变脆、塑性变形能力减弱,宏观上表现为抵抗开裂的能力降低、路用性能逐渐衰退。

4 沥青路面耐久性提升技术与设计方法

4.1 高性能改性沥青技术

高性能改性沥青是提高沥青路面耐久的重要技术措施。改性机理不同可分为聚合物类改性、化学类改性以及复合类改性等形式。SBS 改性沥青是被广泛应用的一种聚合物类改性沥青,在一定程度上可以优化沥青在高温、低温下的性能^[3]。橡胶类改性沥青采用废旧轮胎胶粉,具有较高的经济效益及较好的抗疲劳、抗老化能力。

表 2 高性能改性沥青技术对比

改性技术	改性剂类型	主要提升性能	适用耐久性 问题	典型应用
SBS 改性	苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物	高温稳定性、低温抗裂性	车辙+低温开裂	高速公路、桥面铺装
橡胶改性	废轮胎胶粉	抗疲劳、抗老化、降噪	疲劳开裂、反射裂缝	应力吸收层、磨耗层
高模量改性	硬质沥青或高模量剂	抗车辙、抗剪切	重载车辙	重载交通路段、交叉口
聚氨酯改性	聚氨酯预聚体	综合性能、化学交联	多因素耦合劣化	长寿命路面、特殊路段

基于吸取借鉴 SHRP 计划主要技术指标及测试手段的基础上提出了沥青结合料关键性评价指标的临界值,与路面使用性能具有较好的相关性,在经过验证试验后是可以行之有效的。高性能改性沥青的研究发展趋势是使改性剂与沥青产生化学键合,产生稳定的三维网状结构,在提高总体性能的前提下,提升了抗老化性能。

4.2 抗车辙与抗裂协同设计

沥青路面耐久性的改善既要考虑高温抗车辙也要考

虑低温抗裂性能之间的相互配合,在以往经验中,增加模量以提升抗车辙能力的同时会造成低温抗裂能力下降,两者之间会产生互为制约的作用情况,在对抗车辙、抗裂进行协调设计的时候就是想要通过对材料结构的综合调制来获得这两方面能力的均衡发展。从材料的角度来说,可以通过复合改性的方式来达到效果,SBS 和橡胶粉的共同作用下既可以获得很好的高温稳定性也能够得到良好的低温抗裂性能;从级配的设计来说,骨架密实型的设计既可以带来足够的骨架嵌挤力对车辙产生抵抗作用,并且还能通过合理的沥青用量及矿粉填充满足低温变形的需求。可以协同改善沥青混合料抗车辙能力和抵抗低温开裂问题的新一代高模量沥青改性剂,显著增强了改性剂与沥青之间的相容性和均匀性,在高温条件下能够获得较高的动稳定度大于 10000 次/mm,并且在低温温度下能够达到 2800 $\mu\epsilon$ 的弯拉应变,在结构层面采取的功能层复合的设计方案,例如设置应力吸收层减少反射裂缝的影响,在高温条件下采取高模量基底以防止永久变形的发生等,抗车辙能力以及低温抗裂能力的双重提升还有一条重要的途径就是发展半刚性路面材料。半刚性路面材料开裂机理的研究推动了高黏聚性沥青改性剂的发展,研发出低孔隙率情况下高联通性的沥青骨架柔韧性的设计思路,使得半刚性路面材料的脆断韧度提高一倍以上,并且解决了半刚性材料强度高,易发生破裂的问题。该类型的材料采用浇筑高性能灌浆树脂的方法制成刚柔并济的复合型结构,兼备了刚性结构的抗压疲劳以及柔性结构的防裂性能。

5 结语

本文全面概述了沥青路面材料性质及耐久性的研究流程,由材料结构、材料力学特性及其演变规律以及提高策略构成了一套完整的体系,材料结构是影响性质的前提,沥青结合料种类及矿料级配设计决定了混合料的基本性质;力学特性分析是进行材料的选择和设计的有效参考标准;耐久性演变机制阐明了材料性质退化的自然法则,而老化过程是造成耐久性减弱的主要原因;高性能改良剂和配合性设计手段则给建设持久耐用的路面奠定了技术支持基础。今后的研究要更加深入地理解沥青的老化分子机理,探索以材料基因组理念为基础的有效抗老化和再生方法,使沥青路面材料向着低能耗化以及长效性的目标不断进步。

[参考文献]

[1]张朝政,马翠明,田辉.重交通高性能沥青路面材料服役期耐久性与性能优化[J].建筑技术开发,2025,52(10):152-154.
[2]税司羊.SBS 改性生物沥青老化性能试验研究[J].江西建材,2024(9):55-57.
[3]张涛.复合式沥青路面层状结构粘韧提升技术关键工艺研究[J].交通节能与环保,2025,21(5):218-221.
作者简介:陈伟(1992—),男,湖北省大冶市人,本科,工程师,主要从事公路设计咨询工作。