

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20250220001

文章编号:1674-599X(2025)02-0144-10

引用格式:王文强,孟紫璇.TLA/SBS复合改性沥青配比及性能研究[J].交通科学与工程,2025,41(2):144-153.

Citation: WANG Wenqiang, MENG Zixuan. Ratio and performance of TLA/SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2025, 41(2): 144-153.

TLA/SBS复合改性沥青配比及性能研究

王文强,孟紫璇

(佛山市交通投资集团有限公司,广东 佛山 528313)

摘要:【目的】针对不同特立尼达湖沥青(Trinidad Lake Asphalt, TLA)掺量的苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene, SBS)复合改性沥青,通过建立宏观和微观性能技术指标体系揭示TLA和SBS提升复合改性沥青性能的作用机理,为沥青路面材料的优化提供理论支撑。【方法】采用试验分析方法,设计了13组不同质量配比的TLA/SBS复合改性沥青试验。通过对复合改性沥青的软化点、针入度、延度等性能指标进行测试并结合微观结构表征,揭示不同的TLA掺量对复合改性沥青性能的影响机理。【结果】TLA掺量的增加能显著地提升复合改性沥青在高温下的稳定性,TLA掺量每增加1%,软化点就提高0.221℃,并且TLA掺量的增加能降低复合改性沥青对温度的敏感性;TLA中的灰分均匀分布形成的粗糙表面与孔隙协同作用,增强了基体的稳定性;根据AC-10型沥青混合料的施工要求,确定TLA和SBS最佳质量比为3:7;微观分析表明,火山灰质灰分的叠加可增强沥青界面之间的结合,SiO₂基矿物的组成及其独特的粒度分布可显著地改善复合改性沥青胶浆的黏韧性,通过调控灰分的分布可显著地改善复合改性沥青的性能。【结论】研究结果可为湿热地区重载交通条件下沥青路面的材料设计与性能提升提供方法和依据。

关键词:特立尼达湖沥青;复合改性沥青;温度敏感性;微观结构;最佳配比

中图分类号:U414

文献标志码:A

Ratio and performance of TLA/SBS composite modified asphalt

WANG Wenqiang, MENG Zixuan

(Foshan Communications Investment Group Co., Ltd., Foshan 528313, China)

Abstract: [Purposes] This study aims to establish macro and micro technical performance indicator systems for Trinidad Lake Asphalt (TLA)/styrene-butadiene-styrene (SBS) composite modified asphalt with varying TLA dosages, elucidate the mechanism of performance enhancement by TLA and SBS, and provide theoretical support for optimizing asphalt pavement materials. [Methods] Experimental analysis was employed, involving 13 groups of TLA/SBS composite modified asphalt with different mass ratios. The influence of TLA dosage on composite modified asphalt performance was investigated through performance tests (softening point, penetration index, maximum tensile force in force ductility tests) and microstructural characterization. [Findings] The results demonstrate that increasing TLA dosage significantly improves the high-temperature stability of the composite modified asphalt, with the softening point increasing by 0.221 °C per 1% TLA dosage increase, while reducing temperature sensitivity. The uniform distribution of ash phases enhances matrix stability through synergistic effects of surface roughness and pore structure. Based on the construction

收稿日期:2025-02-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52378123)

通信作者:王文强(1978—),男,高级工程师,主要从事道路工程方面的研究工作。E-mail:752910461@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

requirements of AC-10 asphalt mixtures, the optimal mass ratio is determined as TLA: SBS = 3: 7. Microstructural analysis reveals that pozzolanic ash phases strengthen interfacial bonding via a superposition effect, and the SiO₂-based mineral composition and unique particle size distribution of TLA significantly improve the toughness and tenacity of the composite modified asphalt mortar. The composite modified asphalt performance can be improved significantly through regulating the ash phase distribution. [Conclusions] The findings provide a method and a basis for material design and performance improvement of asphalt pavement for heavy-duty traffic in humid, hot regions.

Key words: Trinidad Lake Asphalt; composite modified asphalt; temperature sensitivity; microstructure; optimal ratio

交通负荷的日益加重,对路面的抗疲劳、抗车辙及耐老化性能提出了更高要求。作为无缝路面结构的常用形式,沥青路面凭借行车舒适度高、维护便捷等优点,在城市道路与高等级公路的建设中占据主导地位^[1-3]。沥青材料在服役期间受雨水、紫外线、氧气及温度等环境因素的综合作用会发生老化,表现为材料的硬化、脆化及其与集料之间的黏附性下降,进而引发集料松散、剥落等病害,并在水分侵蚀下发展为坑槽等水损害问题^[4-5]。在我国南方湿热地区,高温多雨的气候特征与繁重的交通负荷极大地提高了车辙变形与水损害发生的概率^[6-8],开发高性能沥青材料成为延长沥青路面使用寿命和降低后期维护成本的迫切需求。

对于日益凸显的路面早期病害问题,业界广泛应用苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(styrene-butadiene-styrene, SBS)、苯乙烯-丁二烯共聚物(styrene-butadiene rubber, SBR)和特立尼达湖沥青(Trinidad Lake Asphalt, TLA)等改性剂对沥青性能进行改善^[9-12]。邵裴^[13]通过调控SBS掺量研究了SBS改性乳化沥青的环保节能特性及温度适应性,发现优化后的产品在储存稳定性和施工便利性方面得到显著提升。李梦月^[14]采用物理共混技术将SBR、酚醛树脂与基质沥青复合,开发了树脂-橡胶复合改性沥青,通过试验验证了其在温度稳定性与抗老化性方面性能更优。

SBS作为高分子改性剂与沥青共混后可构建三维网络结构,可显著改善沥青材料的热稳定性与抗老化性。在天然沥青中,TLA因其特殊的组分构成而备受关注。研究表明,TLA中沥青质的占比高于普通道路石油沥青中沥青质的占比,这种特征使得TLA具备更高的软化点和更优异的抗变形性能,被广泛应用于沥青材料的改性领域^[15]。另外,TLA具有低挥发性、高分子量和优异的稳定性,能够显著

地提高沥青的抗热氧化和抗紫外老化性能,降低沥青路面老化导致的维护成本,减少资源浪费,对环保具有重要意义^[16]。

本文利用TLA/SBS对沥青进行复合改性,通过调控TLA/SBS掺量在沥青中的比例,探究TLA/SBS掺量对复合改性沥青性能的影响机理及其最佳配比,为耐久性沥青路面建设提供参考。

1 原材料试验

1.1 矿粉

AC-10型沥青混合料为密级配细粒式改性沥青混合料,矿粉掺量为10%,适用于高等级公路表面层。AC-10型沥青混合料与复合改性沥青协同作用可形成黏结基体,其中矿粉与复合改性沥青的界面黏附特性是影响基体强度的决定性因素。经试验得到的矿粉主要技术性能检验结果见表1。

表1 矿粉主要技术性能检验结果

Table 1 Test results of main technical properties of mineral powder

指标	试验方法	要求	结果	
密度/(g·cm ⁻³)	T0352	≥2.45	2.761	
亲水系数/%	T0353	<100	71.98	
筛分试验 通过率/% (水洗法)	孔径0.6 mm	T0351	100	100.0
	孔径0.3 mm	T0351	90~100	99.1
	孔径0.1 mm	T0351	90~100	93.9
	孔径0.075 mm	T0351	75~100	81.0
外观		无团粒结块	无团粒结块	
塑性指数	T0354	<4	3.6	
体积安定性	T0355	良好	良好	

1.2 沥青

试验选取A-70#基质沥青、SBS及TLA三种沥青胶结料,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)分别对这三种沥青胶结料进

行针入度、软化点及延度等主要技术性能指标的测试。

1.2.1 A-70#基质沥青

经试验测定,A-70#基质沥青的主要技术性能检测结果见表2。检测结果表明,A-70#基质沥青的所有性能指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)规定的技术要求。

表2 A-70#基质沥青主要技术性能检测结果

Table 2 Test results of main technical properties of A-70# matrix asphalt

指标	试验方法	单位	要求	结果
针入度(25℃,100g,5s)	T0604	10 ⁻¹ mm	60 ~ 80	71.8
针入度指数	T0604		-1.5 ~ +1.0	0.52
动力黏度(60℃,40kPa)	T0620	Pa·s	≥180	213
软化点(环球法)	T0606	℃	≥46	48.9
延度	(5℃,5cm/min)	cm	≥15	63.7
	(25℃,5cm/min)	cm	≥100	138.7
密度(25℃)	T0603	g/cm ³		1.026
烘箱老化后	质量损失	T0610	%	±0.8
	残留针入度比	T0604	%	≥61
	残留延度比	T0605	%	≥15

1.2.2 SBS改性沥青

SBS改性沥青的主要技术性能检测结果见表3。检测结果均达到I-D型SBS改性沥青的技术要求。

表3 SBS改性沥青主要技术性能检测结果

Table 3 Test results of main technical properties of SBS modified asphalt

指标	试验方法	单位	要求	结果
针入度(25℃,100g,5s)	T0604	10 ⁻¹ mm	40 ~ 60	52.8
针入度指数	T0604		≥0	0.16
当量脆点	T0604	℃		-17.1
动力黏度(60℃,40kPa)	T0620	Pa·s		1660
软化点(环球法)	T0606	℃	≥60	67.7
延度	(5℃,5cm/min)	cm	≥20	45.9
	(25℃,5cm/min)	cm	≥100	56.3
密度(25℃)	T0603	g/cm ³		1.037
烘箱老化后	质量损失	T0610	%	±1.0
	残留针入度比	T0604	%	≥65
	残留延度比	T0605	%	≥15

1.2.3 TLA

TLA改性沥青的主要技术性能检测结果见表4。检测结果均符合规范中改性沥青材料技术标准的要求。

表4 TLA改性沥青主要技术性能检测结果

Table 4 Test results of main technical properties of TLA modified asphalt

指标	试验方法	单位	要求	结果
针入度(25℃,100g,5s)	T0604	10 ⁻¹ mm	0 ~ 5	4.2
针入度指数	T0604			1.80
当量脆点	T0604	℃		2.2
软化点(环球法)	T0606	℃	≥90	100.5
密度(25℃)	T0603	g/cm ³	1.3 ~ 1.5	1.382
灰分质量分数	T0614	%	33 ~ 38	34.2
烘箱老化后	质量损失	T0610	%	±1.0
	残留针入度比	T0604	%	≥50

2 TLA/SBS复合改性沥青性能试验

2.1 不同配比下的技术性能

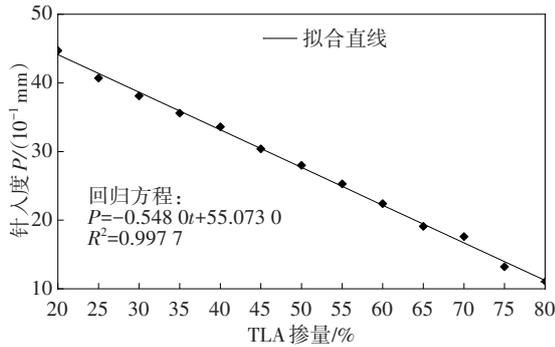
TLA中的天然沥青为硬质沥青,其热敏感性较低,在常规加热条件下与矿料难以均匀拌和,这一特性限制了TLA的应用场景。但因TLA具备天然沥青特有的较高的界面活性,对普通石油沥青表现出良好的相容性,故常作为改性组分与基质沥青复合使用。根据工程实践经验,当TLA掺量低于20%时,对基质沥青的改性效果不显著;但当TLA掺量高于80%时,灰分的沉降离析比较严重,故选择TLA掺量为20%~80%。根据布氏黏度计的测定,230℃时复合改性沥青的表观黏度为1.2 Pa·s,满足常规摊铺工艺的要求。

基于现有的研究成果,确定TLA/SBS复合改性沥青的制备工艺为:将SBS改性沥青加热至170℃,按13种TLA梯度掺量(20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%)进行熔融共混;在试验过程中逐渐升温至230℃,利用3 000 r/min的高速剪切机持续搅拌30 min,制成TLA/SBS复合改性沥青。

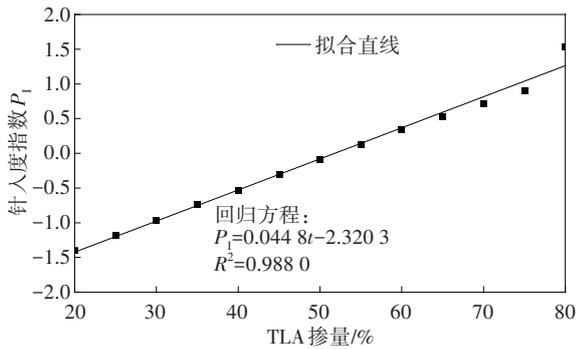
依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制备复合改性沥青标准试件,实施针入度指数测定、软化点(环球法)试验、密度梯度法检测、灰分质量分数燃烧法测定、旋转薄膜烘箱老化试验及低温测力延度试验等指标性能检测试验。值得注意的是,TLA中质量分数高达34.2%的灰分改变了材料断裂的机制,在常规的延度测试中,试件呈现出典型的脆性断裂特征,这说明传统的延度指标已无法有效地表征材料的低温性能,故本文采用断裂能和最大拉力作为技术指标,以更精

准地反映灰分-沥青界面黏结失效的临界应力状态。

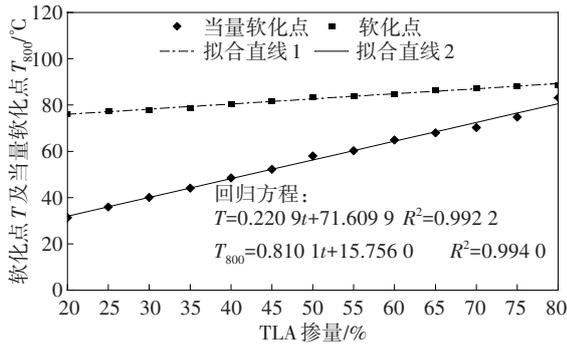
将TLA按预设的13种梯度掺量与SBS改性沥青进行熔融共混,制备成TLA/SBS复合改性沥青。TLA/SBS复合改性沥青各指标与TLA掺量之间的关系如图1所示。进一步运用最小二乘法进行参数拟合,得到各技术指标与TLA掺量之间的回归方程,方程中的 t 表示TLA掺量。



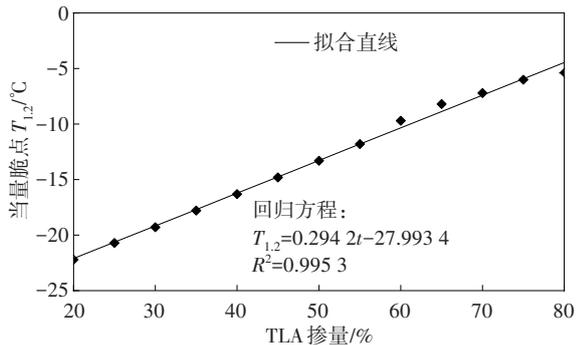
(a) 针入度-TLA掺量



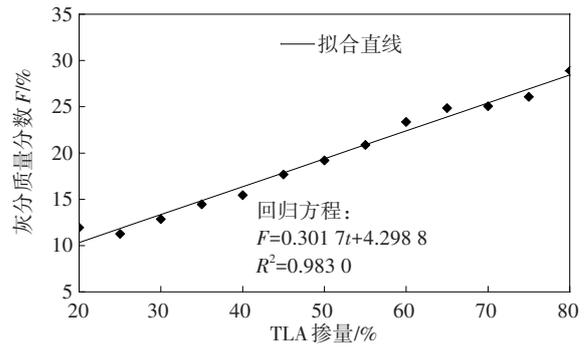
(b) 针入度指数-TLA掺量



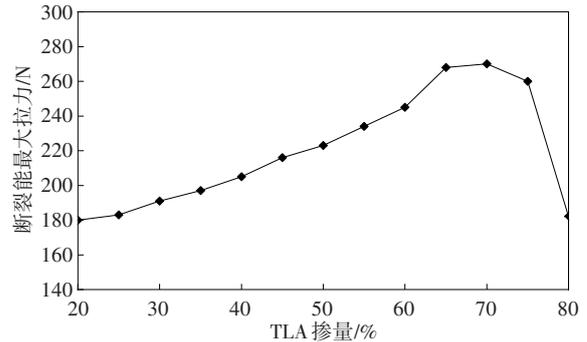
(c) 软化点及当量软化点-TLA掺量



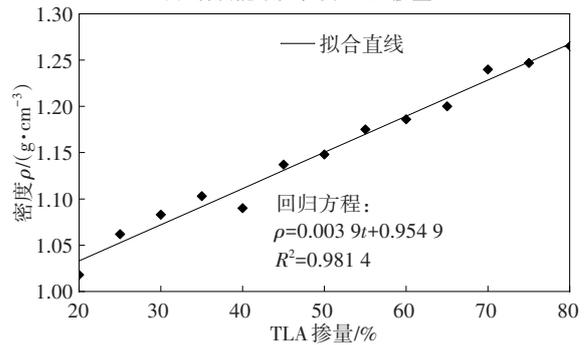
(d) 当量脆点-TLA掺量



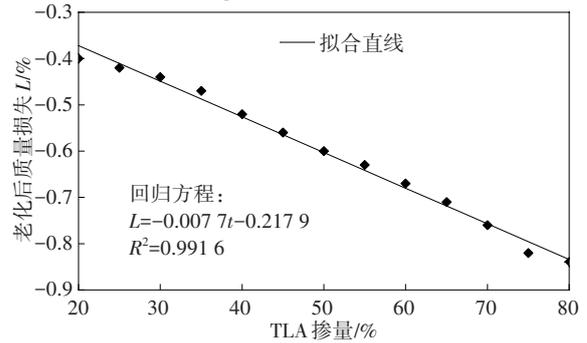
(e) 灰分质量分数-TLA掺量



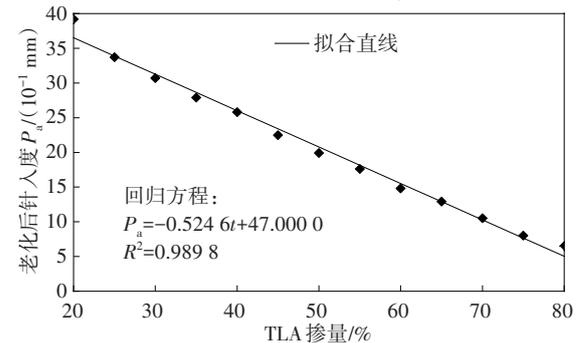
(f) 断裂能最大拉力-TLA掺量



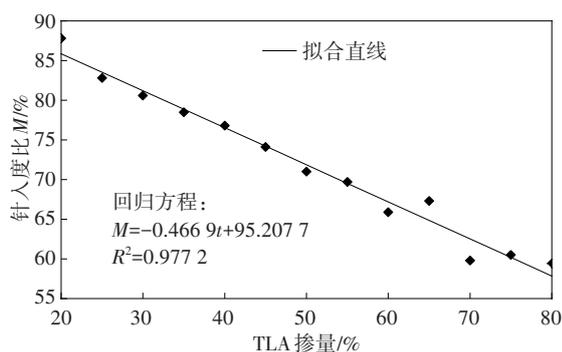
(g) 密度-TLA掺量



(h) 老化后质量损失-TLA掺量



(i) 老化后针入度-TLA掺量



(j) 针入度比-TLA 掺量

图1 TLA/SBS复合改性沥青各性能指标与TLA掺量的相关性分析

Fig. 1 Analysis of the correlations between multiple performance indexes and TLA dosage of TLA/SBS composite modified asphalt

由图1可知,沥青针入度与TLA掺量之间存在严格的线性关系($R^2=0.9977$),针入度随TLA掺量的增加持续衰减,这印证了TLA对沥青流变特性的强化作用。

针入度指数的演变呈现出两个阶段性变化的特征:当TLA掺量为20%~75%时针入度指数保持平稳的增长,而当TLA掺量超过临界掺量后针入度指数的增幅突然发生跃升,此突变现象反映出复合改性沥青体系已进入类凝胶转化阶段。

热稳定性指标软化点和当量软化点均表现出随着TLA掺量的增加正向增长的态势,决定系数分别为0.9922和0.9940,这种热性能的提升源于矿物成分的致密填充及聚合物网络结构的重构效应。

断裂能最大拉力的演化遵循非线性规律:当TLA掺量在中低掺量区间(20%~60%)时,断裂能最大拉力随着TLA掺量的增加呈现为平稳的线性增加;当TLA掺量在高掺量区间(60%~80%)时,断裂能最大拉力与TLA掺量之间符合二次函数的关系;当TLA掺量为70%时,断裂能最大拉力达到270 N的力学极值。

研究表明^[1,15],当填料的分布由离散相转为连续相时,界面应力集中效应呈指数增长并导致复合材料的韧性骤降。当量脆点指标虽随着TLA掺量的增加线性递增,但考虑到灰分对测试的干扰,建议结合多指标联合分析以准确评估材料的低温性能。

材料密度随着TLA掺量的增加持续攀升,这为分析矿物组分对材料本构关系的调控作用提供了量化证据。

耐久性参数(老化后质量损失与针入度比)随着TLA掺量的增加持续衰减。值得注意的是,TLA的地质沉积过程赋予其独特的分子稳定性,常规的老化试验可能低估了其长效服役潜能。

2.2 最佳配比优化

改性沥青配比优化需协调多参数的技术指标:提升热稳定性需提高TLA掺量以增强硬化效应,然而材料的低温韧性在TLA掺量突破临界值后呈现为显著的衰减;针入度指数的非线性跃迁可能引发温敏调控失衡;施工流变特性要求黏度参数控制在常规摊铺工艺允许的范围。

试验数据证实,TLA掺量为30%时达到性能均衡:热稳定指标稳定于80℃,满足沥青性能分级高温段的要求;延展性能处于安全区间,可有效地规避脆化拐点;矿物相的占比(约6%)未突破混合料的低温应变容限。经正交试验验证及沥青混合料适配性评估,最终确定TLA和SBS最佳质量比为3:7,该配比的TLA/SBS复合改性沥青在技术和经济平衡的维度可实现帕累托最优。

2.3 技术性能指标要求

TLA和SBS的质量比为3:7时复合改性沥青具有最优的协同效应,其他性能指标控制为:针入度(25℃,100g,5s)指标应控制在3~5mm,软化点不低于75℃,灰分质量分数为9.5%~11.5%,密度(25℃)为1.1~1.2g/cm³。在满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中单一改性沥青技术指标要求的基础上,针对TLA/SBS复合改性沥青复杂的体系特征,本研究引入界面相容性评价、储能模量变化率等多维评价指标,构建适用于复合改性材料的差异化性能评估体系。

3 TLA/SBS复合改性沥青的改性机理研究

3.1 TLA中矿物相(灰分)的微观组成与物化特性

TLA中的矿物相(灰分)的质量分数为33%~38%,作为调控材料本构关系的核心要素,该活性矿物相通过化学吸附与机械咬合双重作用可显著地提升复合改性沥青的流变特性及界面结合强度。为深入解析灰分的作用机制,本研究建立多级分离工艺,结合动态梯度离心纯化技术和三氯乙烯溶剂置换法,实现矿物相的高效提取与表征。

试验流程分为四个精制阶段:

1) 初级分散阶段。

以三氯乙烯为溶解介质制备TLA胶体溶液,利用密度差异实现粗颗粒矿物的自然沉降。

2) 梯度分离阶段。

将悬浮液转移至离心管,在4 000 r/min的条件下实施动态离心(20~30 min),利用离心加速度突破布朗运动的限制,使亚微米级颗粒富集。

3) 循环纯化阶段。

采用溶剂置换法迭代清洗三次,同步监测溶液透光率,确保沥青组分完全剥离。

4) 后处理阶段。

利用分步干燥工艺,再结合机械解聚处理,最终获得中位粒径为8.20 μm的高纯度灰分样品,为后续矿物相-沥青界面行为研究提供标准试样。

3.1.1 密度试验

为系统地评价TLA中的灰分的材料学特性,本研究选取两种典型的机械粉碎石灰岩填料(矿粉)作为参照物。鉴于填料密度对沥青胶浆的流变特性有显著的调控作用,依据《公路工程集料试验规程》(JTG 3432—2024),采用改进型李氏瓶密度测定法测试矿物相的密度。针对亚微米级灰分容易团聚的特性,在测试TLA中的灰分时选用煤油作为分散介质,在测试矿粉密度时则延续传统的水介质测试方案。这种差异化介质选择策略有效地解决了超细颗粒表面能过高导致的测试偏差问题。三种填料的密度测试结果见表5。

表5 三种填料的密度测试结果

Table 5 Density test results of three types of fillers g/cm³

指标	矿粉1	矿粉2	TLA灰分
密度	2.76	2.80	3.10

由表5可知,三种填料的密度均超过《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)中的限定值(2.45 g/cm³)。特别值得注意的是,TLA中的灰分的密度比矿粉1、矿粉2的大。岩相学研究表明,相较于沉积成因的石灰岩,TLA中的灰分作为火成岩类火山灰物质具备更致密的晶体结构,这种地质学上的差异不仅使得TLA中的灰分的密度更大,同时也预示着TLA中的灰分具有更优的表面化学活性。

3.1.2 粒度分析试验

现行的技术标准对矿物填料粒径的限定相对宽松,而多项试验数据均表明颗粒级配特性直接影响沥青胶结料的结构稳定性。因此,开展填料颗粒粒度分析具有重要的工程价值。针对TLA中的灰分超细的颗粒特性,本研究采用激光衍射法进行精

确表征,激光检测范围覆盖0.1~200 μm全谱段。图2、图3展示了采用上述方法获取的灰分与矿粉的颗粒分布特征图谱。

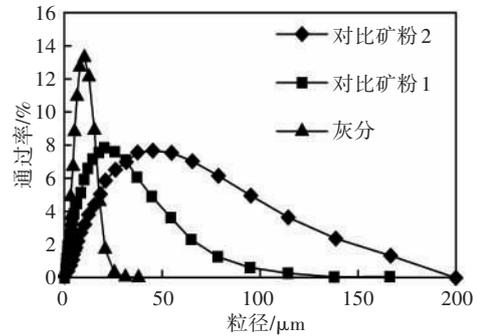


图2 三种填料的分计筛余曲线

Fig. 2 Gradation sieve residue curves of three types of fillers

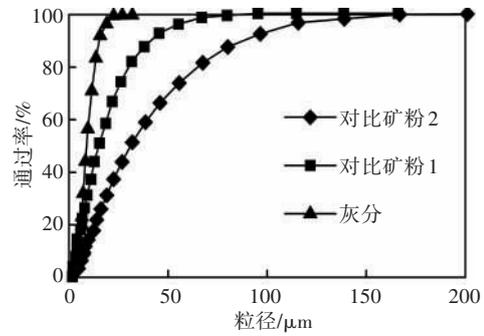


图3 三种填料的累计筛余曲线

Fig. 3 Cumulative sieve residue curves of three types of fillers

由图2可知,TLA中的灰分呈现典型的单峰高斯分布形态,粒径分布区间集中,具备优异的均质化分布特征;矿粉呈现宽域单峰的分布形态,其平均粒径明显比TLA中的灰分的大。这种分布形态和粒径的差异使得TLA中的灰分在沥青基质中能形成更均质的分散体系,从而有效地增强胶浆结构的稳定性。

为定量地表征填料的颗粒特征,本研究构建多参数评价体系,三种填料的粒径分布特征见表6。表中, P_{60} 、 P_{30} 、 P_{10} 分别代表颗粒样本中粒径为60、30、10 μm的颗粒的通过率; $D_{84.13}$ 为级配曲线上84.13%对应的粒径; $D_{15.87}$ 为级配曲线上15.87%对应的粒径。

分析表6中的数据可知,三种填料均满足技术要求,各粒度参数均能有效地表征填料的分布特性。相较于矿粉,灰分的细度模数更小,证实TLA中的灰分具备更优的分散性能;灰分的 P_{10} 为100%,显著高于矿粉1和矿粉2的 P_{10} ,凸显其细颗粒占比优势;灰分的不均匀系数和曲率系数更小,反映其

具有更优的级配连续性;在分布对称性上,灰分的离散度较小,其粒径分布符合理想的高斯分布特征;矿粉的平均粒径为灰分平均粒径的2~5倍,粒径的差异导致比表面积梯度的不同,这种微观特性增强了灰分的吸附效应,可显著地提升胶浆的黏弹性能。

表6 三种填料的粒径分布特征

Table 6 Characteristics of particle size distribution of three types of fillers

指标	矿粉1	矿粉2	灰分
细度模数 F_m	3.94	5.26	2.92
不均匀系数 C_u	6.51	6.70	2.93
曲率系数 C_c	1.26	1.29	1.16
离散度 $\delta_1(D_{84.13}/D_{50})$	2.34	2.33	1.62
离散度 $\delta_2(D_{50}/D_{15.87})$	3.50	3.54	1.99
$P_{60}/\%$	37.10	18.20	70.20
$P_{30}/\%$	80.20	50.20	99.98
$P_{10}/\%$	96.10	77.80	100.00
平均粒径 $D_a/\mu\text{m}$	19.70	39.00	8.20
中位粒径 $D_{50}/\mu\text{m}$	14.50	30.40	7.70

3.1.3 比表面积试验

在沥青混合料体系中,填料组分的比表面积占矿物质集料总比表面积的80%。填料比表面积的增加会显著地增强沥青胶浆体系的结构稳定性,并有效地提升混合料的抗变形性能。因此,比表面积被确定为评价填料品质的关键指标。利用比表面积吸附仪得到的三种填料的比表面积测试结果见表7。

表7 三种填料的比表面积测试结果

Table 7 Test results of specific surface area for three types of fillers $10^4 \text{ cm}^2/\text{g}$

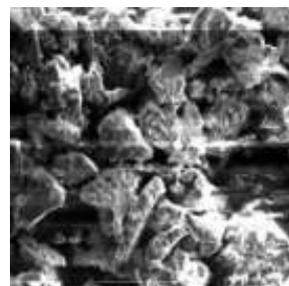
指标	灰分	矿粉1	矿粉2
比表面积	16.20	1.70	1.69

由表7可知,两种试验矿粉的比表面积明显比灰分的低。该结果表明,灰分物质具有更为突出的表面吸附特性,能有效地促进沥青基质与改性剂的界面结合。TLA中的灰分由于其独特的微孔隙结构,可对沥青基质组分进行有选择性的吸附富集,从而显著地改善改性沥青胶浆的热稳定性。

3.1.4 扫描电子显微镜试验

为深入地探究灰分增劲作用的内在机制,本研究采用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)技术和粒子溅射法对材料表面的

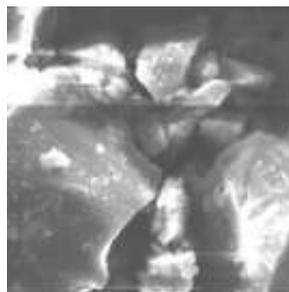
形貌进行表征。矿粉1的SEM照片如图4所示,TLA中的灰分的SEM照片如图5所示。



(a) 放大500倍



(b) 放大1000倍



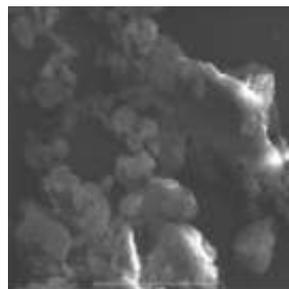
(c) 放大2000倍

图4 矿粉1的SEM照片

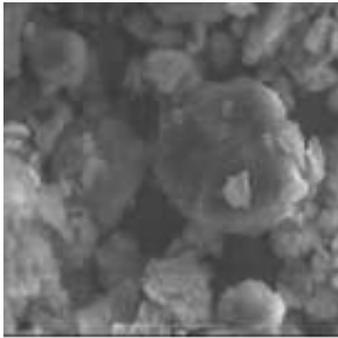
Fig. 4 SEM images of mineral powder 1



(a) 放大500倍



(b) 放大1000倍



(c) 放大2 000倍

图5 TLA中的灰分的SEM照片

Fig. 5 SEM images of the ash of TLA

由图4、图5可知:

1) 在同等放大倍数的条件下,TLA中的灰分的平均粒径明显比矿粉的小。

2) 作为天然火山灰质材料,TLA中的灰分经长期的地质作用形成特殊的颗粒形貌,其表面微区可见典型的凹凸结构。

3) 机械粉碎制备的矿粉呈现典型的解理断裂特征,表面几何形态相对规则,可观察到连续的解理面及定向排列的片状剥落体。这种结构特征导致矿粉的比表面积比火山灰质材料的小。

3.1.5 X射线衍射试验

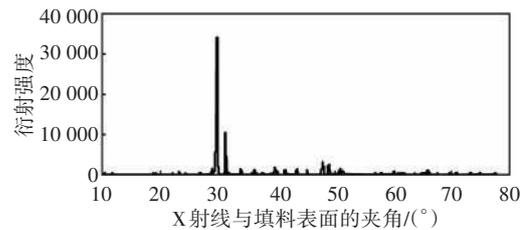
为研究TLA中的灰分的矿物相特征,利用X射线衍射技术对其晶体结构进行分析。三种填料的X射线衍射结果如图6所示。

对图6的衍射谱进行对比可知,TLA中的灰分主要含二氧化硅和钙铝硅酸盐,矿粉1为镁钙碳酸盐组合,矿粉2为碳酸盐-硅酸盐混合体系。X射线衍射结果证明TLA中的灰分属于火山灰质材料,丰富的硅酸盐成分导致其表面极性比碳酸盐基的矿粉的高。

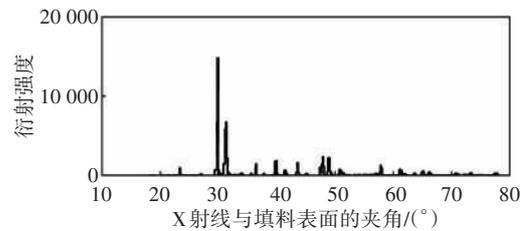
3.2 微观性质研究

试验数据表明,TLA中的矿物成分对沥青基质具有显著的界面增强效应。当采用TLA作为改性剂时,其与沥青基质所形成的复合材料实质上构成了填料浓度较低的胶体体系。

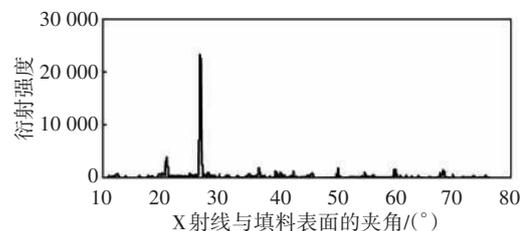
在TLA/SBS复合改性沥青中,灰分表现出高强度、高刚度与低韧性的力学特性,而沥青基体则呈现出低强度、低刚度与高韧性的力学特征。大量研究表明,TLA改性沥青存在低温脆性的问题,SBS改性沥青存在高温耐久性不足的问题,将两者复合可产生显著的“超叠效应”,通过材料性能互补可实现综合性能的优化。研究表明,这种协同效应的作用



(a) 矿粉1



(b) 矿粉2



(c) TLA中的灰分

图6 三种填料的X射线衍射结果

Fig. 6 X-ray diffraction patterns of three types of fillers

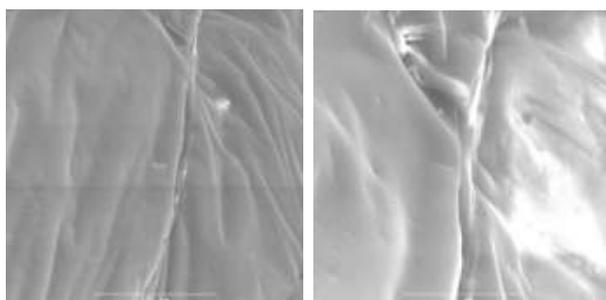
效率与两相界面的结构特性直接相关。为明确界面的作用机制,本研究采用SEM对四种TLA掺量(20%、30%、40%、50%)的试样的微观形貌进行表征,复合改性沥青的SEM照片如图7~10所示。

由图7~10可知:

1) 随着TLA掺量的增加,材料表面灰分颗粒的分布呈现出显著的梯度变化特征。具体而言:当TLA掺量为20%时,试样表面主要呈现出沥青基体的褶皱形貌,未观测到明显的灰分相;当TLA掺量提升至30%时,试样表面开始显现出离散的灰分颗粒;当TLA掺量继续增加至40%时,试样表面出现细颗粒分布;当TLA掺量达到50%时,灰分颗粒呈现出密集分布特征,且界面的吸附效应得到显著提升。

2) 尽管TLA中的灰分存在由密度梯度导致的沉降倾向,但在SBS的协同作用下灰分仍能维持稳定的分散状态。灰分材料的多孔结构增大了比表面积,显著优化了界面的结合能力,进而有效地增强了复合改性沥青的高低温性能、抗紫外线老化性能以及黏韧性。

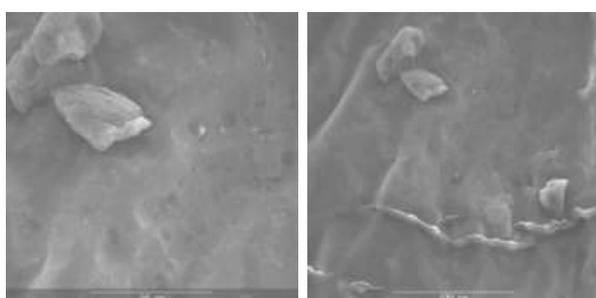
3) TLA中的天然硬质沥青展现出优异的相容性,其极性特征较SBS改性剂的更为显著。通过灰



(a) 放大500倍 (b) 放大1000倍

图7 复合改性沥青的SEM照片(20%TLA掺量)

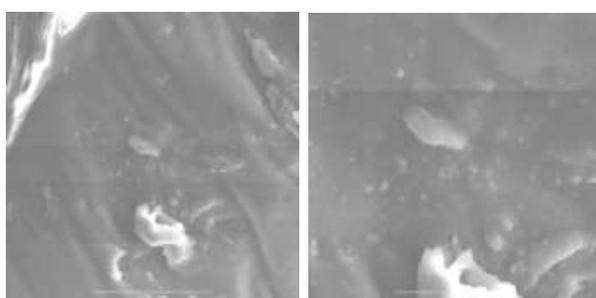
Fig. 7 SEM images of composite modified asphalt (20% TLA dosage)



(a) 放大500倍 (b) 放大1000倍

图8 复合改性沥青的SEM照片(30%TLA掺量)

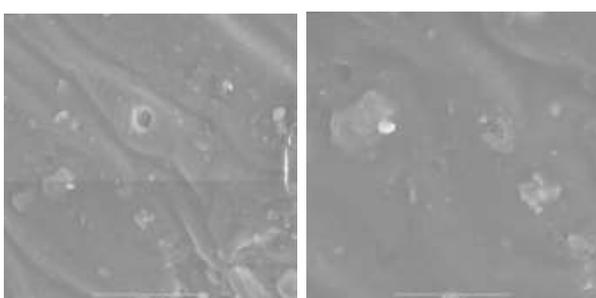
Fig. 8 SEM images of composite modified asphalt (30% TLA dosage)



(a) 放大500倍 (b) 放大1000倍

图9 复合改性沥青的SEM照片(40%TLA掺量)

Fig. 9 SEM images of composite modified asphalt (40% TLA dosage)



(a) 放大500倍 (b) 放大1000倍

图10 复合改性沥青的SEM照片(50%TLA掺量)

Fig. 10 SEM images of composite modified asphalt (50% TLA dosage)

分增强、天然沥青增黏、SBS增韧的协同作用,复合改性沥青的体系稳定性与界面黏附性得到显著的提升,其高温抗变形能力、低温抗裂性、抗疲劳性能及耐老化性能同步得到改善。

4 结论

为开发高性能的TLA/SBS复合改性沥青材料,本文提出13种TLA掺量的改性沥青熔融共混配比,研究复合改性沥青的性能演变规律,通过主要性能指标检测并结合微观结构表征,得到以下结论:

1) TLA作为沥青改性组分不仅能够增强材料的高温稳定性和抗塑性变形能力,还能够改善沥青材料对温度变化的敏感性。

2) 改性沥青中TLA与SBS的质量比为3:7时,复合沥青材料的性能达到最佳,可据此制定适用于TLA/SBS复合改性沥青的技术性能控制标准。

3) 灰分颗粒强化了改性沥青体系的网络骨架支撑作用,增强了灰分-沥青体系的界面作用,显著地改善了TLA/SBS复合改性沥青的综合性能。

参考文献(References):

- [1] 汪海年,郑文华,尤占平,等.聚合物改性剂和石油沥青相容性评价方法研究进展[J].交通运输工程学报,2023,23(1):8-26. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.01.002.
WANG Hainian, ZHENG Wenhua, YOU Zhanping, et al. Research progress on compatibility evaluation methods between polymer modifiers and petroleum asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(1): 8-26. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2023.01.002.
- [2] 钟曦,苏延桂,刘延金,等.不同改性材料对基质沥青性能影响研究[J].青海大学学报,2022,40(6):68-75. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2022.06.011.
ZHONG Xi, SU Yangui, LIU Yanjin, et al. Study on effects of different modifiers on the performance of base asphalt [J]. Journal of Qinghai University, 2022, 40(6): 68-75. DOI: 10.13901/j.cnki.qhwxzbk.2022.06.011.
- [3] 谭沂东.不同掺量EVA改性沥青流变性能研究[J].四川建筑,2022,42(5):276-279.
TAN Lidong. Study on rheological properties of EVA modified asphalt with different dosages [J]. Sichuan Architecture, 2022, 42(5): 276-279.
- [4] 郭旗,薛永兵,马嘉森,等.纳米材料/SBS复合改性沥青研究进展[J].当代化工,2022,51(11):2709-2712,

2717. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.11.044.
- GUO Qi, XUE Yongbing, MA Jiasen, et al. Research progress of nano-material/SBS composite modified asphalt[J]. Contemporary Chemical Industry, 2022, 51(11): 2709-2712, 2717. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2022.11.044.
- [5] 崔亚楠, 杜春晓, 郭立典. 废机油再生沥青的流变性研究[J]. 功能材料, 2022, 53(10): 10116-10121, 10129.
- CUI Yanan, DU Chunxiao, GUO Lidian. Rheological study of waste engine oil recycled asphalt[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(10): 10116-10121, 10129.
- [6] 黄宏康. 岩沥青改性沥青结合料常规和流变性能研究[J]. 西部交通科技, 2022(10): 31-33. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2022.10.009.
- HUANG Hongkang. Study on conventional and rheological properties of rock asphalt modified asphalt binder [J]. Western China Communications Science & Technology, 2022(10): 31-33. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2022.10.009.
- [7] 崔祥密, 李修春, 蔡晓利. 改性沥青老化前后高温性能研究[J]. 中国建筑防水, 2022, (11): 10-13. DOI: 10.15901/j.cnki.1007-497x.2022.11.003.
- CUI Xiangmi, LI Xiuchun, CAI Xiaoli. Study on high temperature performance of modified bitumen before and after aging [J]. China Building Waterproofing, 2022(11): 10-13. DOI: 10.15901/j.cnki.1007-497x.2022.11.003.
- [8] 张韶华, 张丽娟. 湖沥青改性沥青路用性能研究[J]. 建筑, 2021(8): 70-73.
- ZHANG Shaohua, ZHANG Lijuan. Study on pavement performance of lake asphalt modified asphalt [J]. Architecture, 2021(8): 70-73.
- [9] 黄佩佩. TLA和SBR复合改性沥青工作性能试验研究[J]. 西部交通科技, 2024(11): 18-21. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2024.11.006.
- HUANG Peipei. Experimental study on workability of TLA and SBR composite modified asphalt [J]. Western China Communications Science & Technology, 2024(11): 18-21. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2024.11.006.
- [10] 郭诗惠, 刘炳. 纳米材料复配对SBS改性沥青流变及抗老化性能的影响[J]. 中外公路, 2019, 39(3): 241-246. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.050.
- GUO Shihui, LIU Bing. Effects of nanomaterial compound on rheological and anti-aging properties of SBS modified asphalt [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3): 241-246. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.03.050.
- [11] 毕海鹏. 纳米TiO₂/CaCO₃-玄武岩纤维复合改性沥青混合料性能与微观特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- BI Haipeng. Research on performance and microscopic properties of asphalt mixture modified by nano TiO₂/CaCO₃ and basalt fiber [J]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [12] 佟天宇, 常慧亮. 改性沥青的研究现状及展望[J]. 炼油与化工, 2021, 32(6): 1-5. DOI: 10.16049/j.cnki.lyyhg.2021.06.001.
- TONG Tianyu, CHANG Huiliang. Research status and prospect of modified asphalt [J]. Refining and Chemical Industry, 2021, 32(6): 1-5. DOI: 10.16049/j.cnki.lyyhg.2021.06.001.
- [13] 邵斐. SBS改性乳化沥青的制备工艺研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2021. DOI: 10.27148/d.cnki.ghagu.2021.000315.
- SHAO Fei. Study on preparation technology of SBS modified emulsified asphalt [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.27148/d.cnki.ghagu.2021.000315.
- [14] 李梦月. 基于硬质沥青与SBS改性沥青分别制备的高模量沥青性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2022.000591.
- LI Mengyue. Study on high modulus asphalt performance based on hard asphalt and SBS modified asphalt respectively [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022. DOI: 10.27273/d.cnki.gsajc.2022.000591.
- [15] 杨磊. TLA改性沥青中面层在高温多雨地区的应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2020. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2020.000549.
- YANG Lei. Study on TLA modified asphalt as middle course in high temperature and rainy area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020. DOI: 10.27671/d.cnki.gcjtc.2020.000549.
- [16] ZHANG M, YUAN D, JIANG W. Effects of TLA on rheological, aging, and chemical performance of SBS modified asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2024, 438: 137283. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.137283.

(责任编辑:熊怡)