

高黏添加剂对橡胶沥青及其混合料性能的影响

杨艳柯¹, 李惠霞¹, 庄金平¹, 邵景干²

(1. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 河南交院工程技术集团有限公司 绿色高性能材料应用技术交通运输行业研发中心, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对透水沥青路面多孔结构导致耐久性不足及橡胶沥青改性技术相容性差等问题, 文章提出采用高黏沥青添加剂 (tafpack-super, TPS) 对橡胶沥青进行复合改性, 探究了不同 TPS 掺量对材料性能的影响机制。结果表明, TPS 与橡胶的协同改性效应呈现显著剂量依赖性, 当掺量为 9% 时, 复合改性沥青的抗车辙性能、抗疲劳特性与水稳定性实现协同优化, 其改性混合料的黏附性和力学性能显著提升, 可有效增强透水路面的结构耐久性。研究通过整合废弃轮胎橡胶再生利用与 TPS 改性技术, 构建了环境-性能协同强化的沥青材料体系。该成果提出基于 9% TPS 掺量的改性工艺, 为海绵城市透水路面的气候适应性设计提供了新思路, 同时为绿色低碳道路工程材料的研发与应用提供了理论依据与技术路径。

关键词: 透水沥青路面; 橡胶沥青; 沥青混合料; TPS; 力学性能; 耐久性; 路用性能

中图分类号: U416; U214

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2025)04-0331-07

Effect of high-viscosity additives on properties of rubberized asphalt and its mixtures

YANG Yanke¹, LI Huixia¹, ZHUANG Jinping¹, SHAO Jinggan²

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Green High-performance Material Application Technology Transportation Industry R&D Center, Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In response to the issues of insufficient durability caused by the porous structure of permeable asphalt pavement and the poor compatibility of rubber asphalt modification technology, this study proposes the use of a high-viscosity asphalt additive (TPS) to compound and modify rubber asphalt, systematically exploring the impact of different TPS dosages on material properties. Results show that the synergistic modification effect of TPS and rubber exhibits significant dose dependency. When the dosage is 9%, the rutting resistance, fatigue resistance, and water stability of the composite modified asphalt are synergistically optimized, and the adhesion and mechanical properties of the modified mixture are significantly improved, effectively enhancing the structural durability of permeable pavements. The study integrates the recycling of waste tire rubber with TPS modification technology to construct an asphalt material system that synergistically enhances both environmental and performance aspects. The findings innovatively propose a modification process based on a 9% TPS dosage, providing new ideas for the climate-adaptive design of permeable pavement materials in sponge cities, and offering a theoretical basis and technical pathway for the development and engineering application of green, low-carbon road engineering materials.

Keywords: permeable asphalt pavement; rubber asphalt; asphalt mixtures; TPS; mechanical properties; durability; pavement performance

收稿日期: 2024-09-05

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (2021J011060)

第一作者简介: 杨艳柯 (1998—), 女, 河南叶县人, 硕士研究生, 研究方向: 工程材料。

通信作者: 李惠霞 (1979—), 女, 河南商丘人, 副教授, 博士, 研究方向: 工程材料。

透水沥青路面在现代海绵城市建设中发挥着至关重要的作用,为城市水管理提供了可持续的解决方案。其高空隙率和排水通道能够有效消除雨天路面水膜,显著提升路面的抗滑性能 and 安全性,同时降低交通噪音和水雾等环境问题的影响^[1]。然而,这种多孔结构也使沥青更容易受到水、空气和阳光的侵蚀,加速氧化和硬化过程,从而影响路面的耐久性^[2]。

橡胶沥青通过将废旧轮胎制成的胶粉添加到基质沥青中,不仅有效利用了废弃资源,还显著提升了沥青的黏附性、弹性和抗疲劳裂缝扩展能力,从而延缓路面的老化与损伤^[3]。然而,橡胶粉与沥青之间的不相容性可能导致材料在使用过程中分离和劣化,尤其在水和荷载作用下,橡胶颗粒容易脱落,影响路面的耐久性^[4]。

为应对上述问题,TPS 作为一种高黏度改性剂被引入沥青路面应用中。汤俊卿等^[5]发现,TPS 用量超过 10% 可能影响稳定性,而 13% ~ 18% 的 TPS 浓度在提高黏度和抗变形性能方面表现出色^[6]。此外,李霞的研究发现^[7],CR/TPS 复合改性沥青在水稳定性和抗低温开裂性方面表现优异,特别是当 CR 含量为 16% ~ 20%、TPS 含量为 8% ~ 10% 时,性能优于单一 TPS 改性沥青。Feng Wang 等^[8]的试验进一步表明,在颗粒碎屑橡胶沥青混合物中加入 12% 的 TPS 改性剂,可显著提高其水稳定性、耐久性和黏附性能。兰添晖等^[9]的研究也指出,15% 的 TPS 用量在排水性沥青混合料中表现出良好的动稳定性和低温抗裂性。

尽管已有研究取得了一定进展,但目前针对 TPS 改性橡胶沥青的系统性研究仍较为有限,特

别是在性能优化、相互作用机制和分子水平表征方面。本研究旨在通过物理性能评估、流变分析、组分相容性评估以及界面相互作用分析,深入探讨 TPS 改性橡胶沥青的性能提升机制,为优化 TPS 改性提供理论指导,并为工程应用提供实践参考。

1 试验概况

1.1 原材料

(1) 选用 70# 基质沥青作为研究对象。通过试验测量,该沥青的针入度为 70.2 (0.1 mm),软化点为 48.9 ℃,5 ℃ 时的延度为 159 cm,各项指标均符合技术要求。

(2) 试验所用橡胶粉比重为 1.21 g/cm³,含水率 0.63%,金属含量 0.009%,纤维含量 0.08%。这些指标均符合《公路温拌橡胶沥青混合料施工技术规程》(T/CECS G:K44-01-2020)^[10] 相关要求,确保符合沥青橡胶黏合剂的技术要求。

(3) 试验用石灰岩按粒径分为 4 种规格:粗料:16 ~ 13.2 mm (1#)、13.2 ~ 9.5 mm (2#)、9.5 ~ 4.75 mm (3#);细料:4.75 ~ 0 mm (4#)。

(4) 所用高黏添加剂为 TPS。该添加剂具有高黏度特性,能够显著改善橡胶沥青的性能。

1.2 配合比设计

本研究基于 OGFC-13 型级配设计高黏透水性沥青混合料。通过实验确定的沥青混合料合成级配见表 1。在配置高黏改性沥青时, $w_{橡胶粉}$ 为 20%, w_{TPS} 分别以 9%、12% 和 15% 的比例加入。通过马歇尔试验确定,沥青混合料的最佳 $w_{沥青}$ 为 4.8%。

表 1 混合料级配
Tab.1 Mixture gradation

级配类型	通过以下筛孔的 $w_{沥青}/\%$									
	0.075 mm	0.15 mm	0.3 mm	0.6 mm	1.18 mm	2.36 mm	4.75 mm	9.5 mm	13.2 mm	16 mm
规范要求	2~7	3~8	3~12	4~15	6~18	10~22	12~30	60~80	90~100	100
最终级配	5.1	6.8	8.0	10.2	12.6	14.3	19.5	74.0	95.6	100.0

1.3 试验内容

(1) 基本物理性能试验

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)^[11](以下简称《规程》),沥青

的针入度、软化点和延度试验均严格按照标准方法测试,以确保结果的准确性和可靠性。

(2) 流变性能试验

依据《规程》^[11],采用动态剪切流变仪对沥

青结合料的流变性能进行测试。试验采用直径 25 mm 的平行板,样品厚度 1 050 μm,剪切间隙 50 μm。温度扫描范围为 40 ~ 82 ℃,以 1 ℃ 为增量,测试频率固定在 10 rad/s,应变水平为 12%。

主要测量复数劲度模量 (G^*) 和相位角 (δ) 两个关键黏弹性参数。进一步计算车辙因子 ($G^*/\sin\delta$) 和疲劳因子 ($G^* \cdot \sin\delta$),分别用于评估沥青的高温变形抗力和疲劳性能。

(3) 力学性能试验

通过单轴压缩和劈裂试验测试沥青混合料的抗压和抗拉性能。试验中记录试件的破坏荷载,并据此计算抗压和劈裂抗拉强度,以综合评价沥青混合料的力学性能。

(4) 黏附性能试验

依据《规程》^[11],采用水浸法和浸水马歇尔试验综合评价沥青混合料的黏附性能。

水浸法:通过观察集料表面包裹沥青的剥落情况,计算剥落面积的百分率,并根据表 2 中的分级标准评定沥青与集料的黏附性等级。

浸水马歇尔试验:利用多功能全自动沥青压力试验机测试试件的稳定度与流值,计算得到的马歇尔模数用于评价沥青与集料的黏附性。

这两种方法结合使用,能够全面评估沥青混合料在水环境下的黏附性能和耐久性。

表 2 沥青与集料的黏附等级

Tab.2 Adhesion grade of asphalt to aggregates

试验后集料表面沥青剥落情况	黏附等级
沥青膜无剥离,完全黏附于集料表面,剥离面积百分率接近于 0	5
沥青膜少量移动剥离,厚度呈现不均匀分布,剥离面积百分率接近于 10%	4
沥青膜局部明显移动剥离,基本保留在集料表面,剥离面积百分率接近于 30%	3
沥青膜大量被移动剥离,少量保留在集料表面,剥离面积百分率大于 30%	2
沥青膜完全移动剥离,集料完全裸露,沥青全浮于水面	1

(5) 冻融劈裂试验

依据《规程》^[11]进行冻融劈裂试验,测定沥青混合料在冻融条件下的强度比,评价其水稳定性。

2 试验结果及分析

2.1 高黏添加剂对沥青性能影响

2.1.1 高黏添加剂对沥青基本物理性能影响

图 1 展示了随着 w_{TPS} 变化,改性沥青的针入度、软化点和延度等物理性能指标的试验结果。

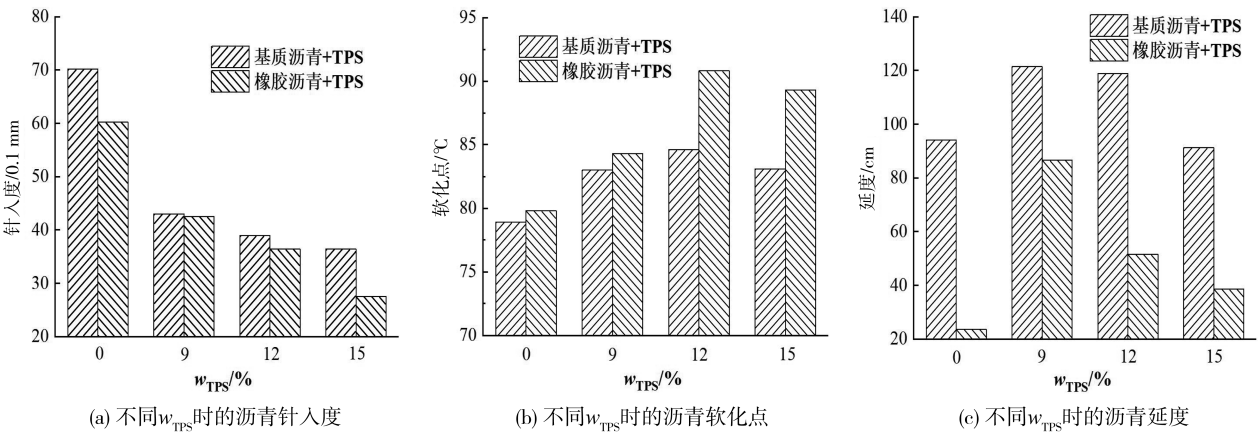


图 1 不同 w_{TPS} 时的沥青针入度、软化点、延度

Fig.1 Needle penetration, softening point, and ductility of asphalt at different w_{TPS}

如图 1(a) 所示, w_{TPS} 增加显著降低基质沥青与橡胶沥青的针入度值,且 TPS/橡胶复合改性沥青的针入度值始终低于单一 TPS 改性沥青。此现象表明,橡胶粉与 TPS 联合使用时,二者通过吸收沥青轻质组分并膨胀,使胶质与沥青质含量

增加,导致沥青硬化速率加快,针入度降幅达 35%。当 w_{TPS} 为 9% 时,复合改性沥青的针入度 (25 ℃ 下 42.5 mm) 满足《规程》^[11],过量添加将导致针入度超出标准允许范围。

如图 1(b) 所示,软化点随 w_{TPS} 呈先升后降趋

势,复合改性沥青的高温性能显著优于单一改性体系。其作用机制为:橡胶粉溶胀作用使沥青质含量增加,配合 TPS 的热塑性弹性特征,复合改性沥青在 w_{TPS} 为 12% 时的软化点最高达 91.6 ℃ (较基质沥青提升 7.4%)。最优配比为: w_{TPS} 为 12% 时,复合改性沥青软化点达到峰值,过量添加 (> 12%) 因分子链缠结过度导致热稳定性下降。

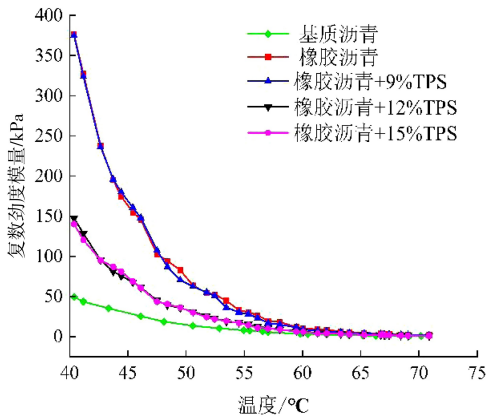
如图 1(c) 所示,低温延度随 w_{TPS} 呈非线性变化,复合改性沥青表现出临界优化效应。当 w_{TPS} 为 9% 时,其与橡胶粉协同形成三维交联网络,延度值达 86.6 cm,较单一橡胶沥青提升 3.7 倍。然

而,当 w_{TPS} 超过 9% 后,沥青质比例上升引发脆性相占比增加,导致延度值回落至 38.6 cm。

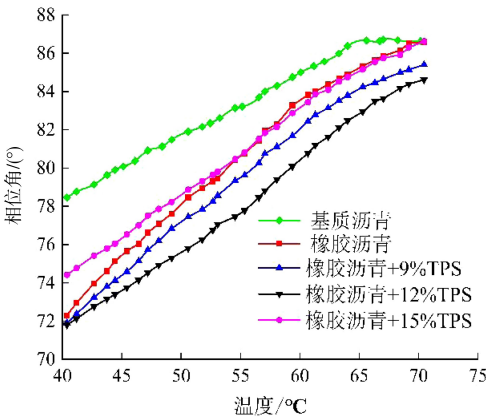
实验表明,TPS/橡胶复合改性沥青的性能与 w_{TPS} 紧密相关。综合考量针入度、延度、软化点等性能指标以及不同气候条件下的实际需求,推荐在各类工程中优先采用 w_{TPS} = 9% 的配比。 w_{TPS} = 9% 的复合改性沥青在兼顾高低温性能的同时,能有效避免因 w_{TPS} 不当引发的性能逆转风险,无论是在高温多雨区域,还是低温寒冷地区,都能有良好的性能表现,满足多样化的工程应用需求。

2.1.2 高黏添加剂对沥青流变性能影响

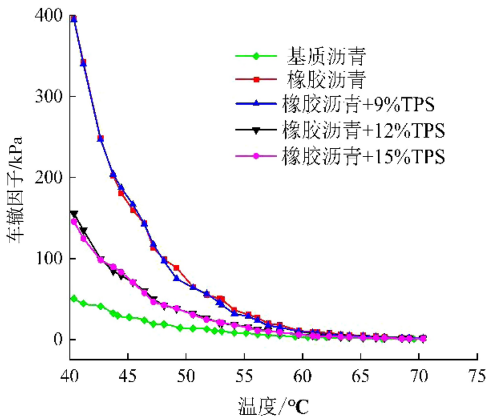
高黏改性沥青的剪切流变试验结果如图 2。



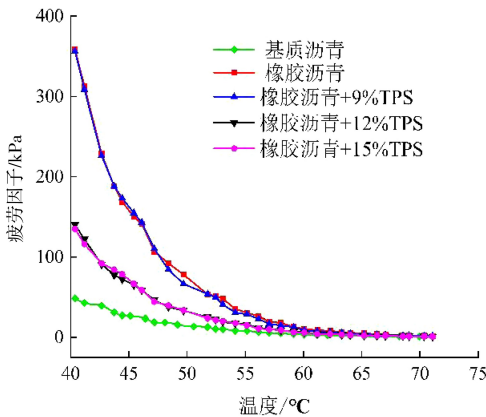
(a) 温度与复数劲度模量关系图



(b) 温度与相位角关系图



(c) 温度与车辙因子关系图



(d) 温度与疲劳因子关系图

图 2 温度与 (a) 复数劲度模量 (b) 相位角 (c) 车辙因子 (d) 与疲劳因子的关系

Fig.2 Relationship between temperature and complex modulus (a) of strength phase angle (b) rutting factor (c) fatigue factor (d)

如图 2(a) 所示,随温度升高,沥青复数劲度模量 (G^*) 呈指数型衰减,表明材料抵抗剪切变形的能力显著弱化。橡胶沥青和 w_{TPS} 为 9% 的复合改性沥青在相同温度下的 G^* 值最高,表现出最佳

的抗剪切变形能力。然而,当 w_{TPS} 超过 9%, w_{TPS} 为 12% 和 15% 时,复合改性沥青的 G^* 值下降,这与 w_{TPS} 过量引发的相分离直接相关。

从图 2(b) 的相位角 (δ) 数据可以看出,随着

温度上升,沥青的相位角(δ)增大,意味着其弹性减弱而黏性增强,这使得沥青更易出现不可逆变形,从而降低了其抗疲劳开裂和抗车辙的能力。 w_{TPS} 为12%的橡胶复合改性沥青在相同温度条件下展现出更低的 δ 值,这一结果表明, w_{TPS} 为12%的复合改性沥青能更好地保持其弹性特性,在抵抗疲劳开裂和车辙形成方面具有明显的优势。

在评价复合材料的相容性时, G^* 和 δ 是两个至关重要的指标。对于相容性优良的复合材料而言,其内部各组分能够均匀分散,进而形成连续的网络结构,在性能上体现为较高的 G^* 值以及较低的 δ 值。通过以上数据可知,在橡胶沥青中加入TPS后,橡胶沥青的抗变形能力和储存稳定性均得到了显著增强,这一现象充分表明,TPS与橡胶沥青之间具有良好的相容性,能够切实有效地提升材料的整体性能。深入探究其作用机制,主要是因为TPS能够吸附于橡胶颗粒的表面,降低橡胶颗粒的表面能,促使橡胶颗粒在沥青中均匀分散,避免出现聚集现象^[12]。与此同时,TPS独特的分子结构使其既能够与沥青相互融合,又能与橡胶良好相容,在两者之间起到桥梁的关键作用,极大地增强了界面结合力^[13]。

图2(c)和图2(d)数据显示,橡胶沥青与 w_{TPS} 为9%的复合改性沥青的车辙因子($G^*/\sin\delta$)和疲劳因子($G^* \cdot \sin\delta$)值最高,这表明二者在抗高温变形和抗疲劳性能方面优势显著。其中,橡胶粉的作用在于提升沥青的 G^* ,而 w_{TPS} 为9%的复合改性沥青则凭借其热塑性网络结构进一步强化了沥青的刚度,二者相互配合,形成了显著的协同效应。而当 w_{TPS} 提升至12%和15%时,由于材料间的相容性问题逐渐凸显,导致 G^* 降低,与之相应地,车辙因子和疲劳因子也随之下降。反观基质沥青,由于缺少改性剂的加持, G^* 最低,车辙因子和疲劳因子的数值也明显劣于改性沥青,这一对比充分彰显了改性剂剂量调控对于实现沥青性能平衡的关键作用。

综合各项试验数据表明,将橡胶粉与TPS复合应用,可显著提升沥青的抗疲劳开裂性能与抗车辙性能。具体而言,橡胶粉能够增大沥青的黏性,使其在高温环境下稳定性增强,在低温条件下延展性提升;而TPS所具备的热塑性弹性体特性,赋予了改性沥青卓越的弹性恢复能力,保证其

在不同温度下均能维持性能稳定。不过,当TPS比例过高时,反而会对上述改善效果产生不利影响。一旦 w_{TPS} 过量,会干扰其与沥青的相容性,破坏TPS连续相的稳定性,致使改性沥青难以在TPS网状结构中均匀分散,最终降低改性成效。基于此,综合考量各方面性能,推荐选用 w_{TPS} 为9%的橡胶复合改性沥青,以此实现最佳的性能平衡,满足实际工程应用中的多样化需求。

2.2 高黏添加剂对沥青混合料性能的影响

基于上述对沥青材料性能的研究发现,将9%的TPS掺入沥青中能有效提升其性能。为进一步探究其在实际路用中的性能表现,将9%的TPS分别掺入基质沥青和橡胶沥青,制成混合料试件,并通过力学试验、黏附性试验和冻融劈裂试验进行分析。

2.2.1 TPS/橡胶复合改性沥青的力学性能

w_{TPS} 与混合料间力学性能关系见图3。如图3(a)和图3(b)所示,TPS/橡胶复合改性沥青混合料的力学性能显著提升。具体而言,在橡胶沥青混合料中添加 w_{TPS} 为9%的复合改性沥青后,其单轴抗压强度达到了8.76 MPa,较未改性时提升117%;劈裂抗拉强度为2.48 MPa,较未改性时提升64%。与之相比,基质沥青体系的单轴抗压强度和劈裂抗拉强度分别为4.97 MPa和2.08 MPa,明显低于添加TPS后的橡胶沥青混合料。这种提升一方面是因为橡胶粉与TPS形成了三维互穿网络结构,其中TPS的热塑性网络与沥青胶体相互交织,如同细密的网格一般,有效地限制了自由沥青的流动,从而增强了混合料的稳定性。另一方面,橡胶粉表面对TPS极性基团的吸附,大大增强了沥青与集料界面的黏结强度,使得整个混合料结构更加稳固^[14]。

进一步对比发现,对于基质沥青体系,即便同样添加 w_{TPS} 为9%的复合改性沥青,其抗压强度仅提升1%,与橡胶沥青体系的大幅提升形成鲜明对比。这一现象充分表明,橡胶粉所具备的弹性恢复能力,在强度提升过程中发挥着关键作用。

总体而言,9%的TPS加入,显著优化了橡胶沥青混合料的力学性能。不仅促使其形成了更为坚固的骨架嵌挤结构,增强了沥青与集料之间的黏结力,还提升了混合料的柔韧性,使其在实际应用中具备更好的性能表现。

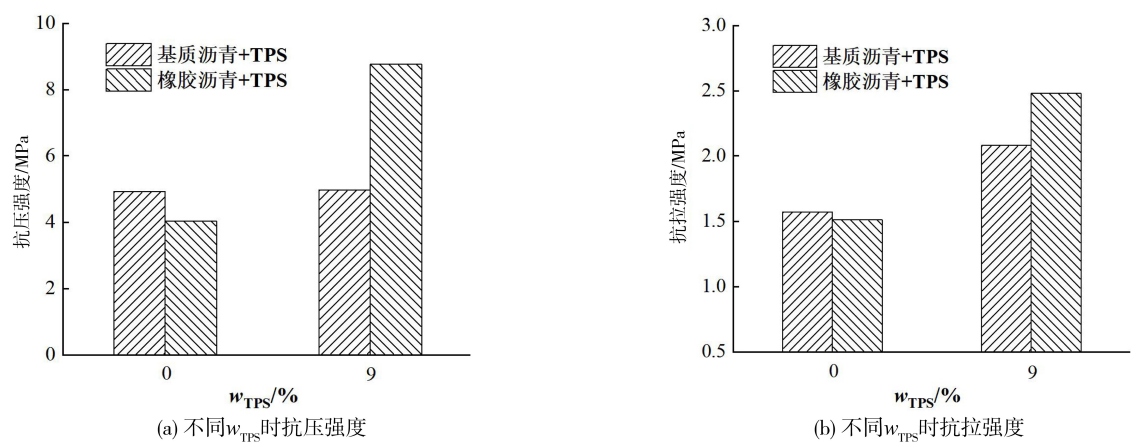


图 3 不同 w_{TPS} 时抗压和抗拉强度

Fig.3 Compressive and tensile strength at different w_{TPS}

2.2.2.2 TPS/橡胶复合改性沥青的黏附性能

水浸法试验结果见表 3。根据表 3 数据可知,在沥青混合料中添加 9% 的 TPS 可显著提升黏附性能。具体而言,在橡胶沥青中加入 9% 的 TPS 后,剥落率等级提升 2 级;在基质沥青中加入 9% 的 TPS 后,等级提升 1 级,说明 TPS 对橡胶沥青黏附性能的优化效果更好。这是因为 TPS 分子的极性基团能与橡胶表面化学吸附,降低界面能,抑制水分对沥青-集料界面的侵蚀,增强二者间的黏结强度,进而提升沥青混合料的黏附性能。然而,单独添加橡胶粉时,剥落率增加,黏附等级下降。这是因为在水-荷载作用下,橡胶颗粒易从沥青与集料的界面脱落,无法增强黏附性能,甚至起负面作用。

表 3 水浸法试验结果

Tab.3 Water immersion test results

单位:个

配比	黏附等级					合计
	1	2	3	4	5	
基质沥青	—	—	—	2	18	20
基质沥青+9%TPS	—	—	—	1	19	20
橡胶沥青	—	—	1	4	15	20
橡胶沥青+9%TPS	—	—	—	4	16	20

浸水马歇尔试验结果见图 4,结果表明, w_{TPS} 为 9% 的橡胶复合改性沥青的马歇尔模数显著优化。当在橡胶沥青中加入 9% 的 TPS 后,其马歇

尔模数增加至 3.75 kN/mm,相比未添加时增幅达 49%。这主要归因于 TPS 能够增加集料表面沥青膜的厚度,有效减少水分的渗透路径。此外,橡胶沥青与 w_{TPS} 为 9% 的马歇尔模数相较于基质沥青与 w_{TPS} 为 9% 的马歇尔模数提高了 21%,这是由于橡胶粉的弹性恢复力与 TPS 形成的刚性网络之间产生协同效应,共同抑制微裂缝的扩展。

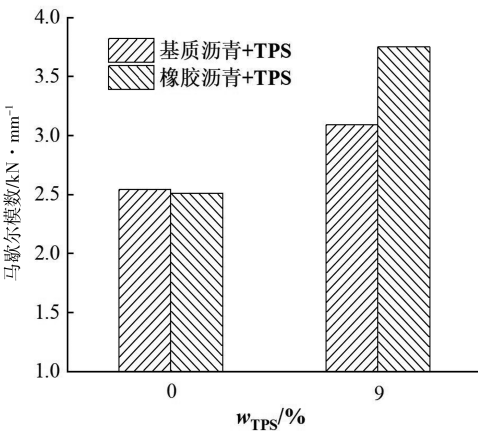


图 4 不同 w_{TPS} 时马歇尔模数

Fig.4 Marshall modulus with different w_{TPS}

综合两项试验结果,TPS 改性剂和橡胶粉改性剂结合使用能够显著提升沥青的黏附性能,在沥青与集料之间形成更稳定的整体结构。其中, w_{TPS} 为 9% 的橡胶复合改性沥青配比不仅增强了黏附力,还通过提升各项性能指标,有效提高了路面的耐久性。因此,从性能和实际应用角度考量, w_{TPS} 为 9% 的橡胶复合改性沥青是更为合适的选择,有望在道路工程中发挥更大的作用,提升道路

的质量和使用寿命。

2.2.3 TPS/橡胶复合改性沥青的水稳定性
沥青混合料的冻融劈裂试验结果如表 4 所示。

表 4 冻融劈裂试验强度结果

Tab.4 Results of freeze-thaw splitting test strength

配比	常规劈裂抗拉强度平均值/MPa	冻融劈裂抗拉强度平均值/MPa	冻融劈裂试验强度比/%
基质沥青	0.63	0.46	73.02
基质沥青+9%TPS	0.89	0.78	87.64
橡胶沥青	0.68	0.62	91.18
橡胶沥青+9%TPS	0.95	0.91	95.79

由表 4 可知,基质沥青混合料的冻融劈裂强度比仅为 73.02%,未能达到技术要求的 85%。而橡胶沥青与 w_{TPS} 为 9%的橡胶复合改性沥青的冻融劈裂强度比分别达到 91.18% 与 95.79%,充分显示出改性剂对提升水稳定性具有显著效果。具体而言,TPS 的极性基团能够与橡胶颗粒表面形成氢键网络,从而有效降低了剥落率。与此同时,橡胶粉与 TPS 的复合改性体系会形成三维互穿网络结构,这种结构能够限制自由水的迁移,进一步增强水稳定性。

值得注意的是, w_{TPS} 为 9%的橡胶复合改性沥青的冻融劈裂强度比超过 95%,这一出色的性能表现,使其在高湿度、冻融频繁的区域具有极高的适用性。这种复合改性技术主要通过增厚沥青膜、强化界面键合以及优化黏弹效应等途径,成功将冻融劈裂强度比提升了 22.77%,将水稳定性推向最优水平,为在严酷环境下实施路面工程提供

了可靠的技术支撑。

3 结论

1) TPS/橡胶复合改性沥青性能与 TPS 含量紧密相关。 w_{TPS} 为 9%时,针入度达标,延度大幅提升,虽软化点未达最高,但综合高低温性能和工程需求,此配比在不同气候下性能良好,能规避风险,是兼顾多指标、满足多样工程应用的优选。

2) 橡胶粉与 TPS 复合使用时,橡胶粉增大沥青黏性,TPS 赋予弹性恢复力,二者形成三维互穿网络,限制自由水迁移、降低剥落率,从而显著提升沥青抗疲劳开裂、抗车辙性能及水稳定性。但 TPS 比例过高会影响与沥青的相容性。综合考量, w_{TPS} 为 9%的橡胶复合改性沥青在性能平衡上表现最佳,其冻融劈裂强度比超过 95%,在高湿度、冻融频繁区域也能稳定发挥作用。

3) 在沥青混合料中添加 9%的 TPS,能显著提升黏附性能和力学性能。在橡胶沥青中加入后,剥落率等级提升 2 级,马歇尔模数增加至 3.75 kN/mm,增幅达 49%,有效增强了沥青与集料之间的黏结强度;单轴抗压强度提升 117%,劈裂抗拉强度提升 64%。这主要得益于橡胶粉与 TPS 形成的三维互穿网络、增强的界面黏结强度、以及 TPS 增加的沥青膜厚度。

4) TPS/橡胶复合改性通过优化黏弹效应、强化界面键合等方式,全面提升了沥青性能。 w_{TPS} 为 9%的橡胶复合改性沥青凭借在高低温性能、抗疲劳抗车辙、力学性能、黏附性能以及水稳定性等多方面的卓越表现,成为道路工程材料更为合适的选择,能够有效提高路面的耐久性和使用寿命,具有极高的推广价值和应用前景。

参考文献:

[1] 肖飞鹏,王涛,王嘉宇,等. 橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J]. 中国公路学报,2019,32(4):73-91.

[2] LUO L,CHU L,FWA T F. Molecular dynamics analysis of oxidative aging effects on thermodynamic and interfacial bonding properties of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials,2021,269:121299.

[3] JIN D,MOHAMMADI S,XIN K,et al. Laboratory performance and field demonstration of asphalt overlay with recycled rubber and tire fabric fiber[J]. Construction and Building Materials,2024,438:136941.

[4] 底秀玲,仲富,仇新玲,等. 橡胶粉改性沥青的热稳定性及其复合沥青的研究[J]. 化工新型材料,2023,51(2):229-234.

[5] 汤俊卿,陈伟康,刘兵,等. TPS 改性剂对高黏改性沥青流变性能稳定性的影响[J]. 公路交通科技,2023,40(S1):1-8.

参考文献:

- [1] XU Z Y,ZHANG X,HE J,et al. First-zone distance relaying algorithm of parallel transmission lines for single-phase to ground faults[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2016,80:374-381.
- [2] 秦瑜,文明浩,白宇,等. 在线估计判据极值的高压直流线路新型距离保护[J]. 中国电机工程学报,2020,40(12):3888-3897.
- [3] 李菁,郑涛,赵裕童,等. 双馈风电短路电流特性对距离保护的影响分析[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(6):37-47.
- [4] ZHANG F,MU L H. A fault detection method of microgrids with grid-connected inverter interfaced distributed generators based on the PQ control strategy[J]. IEEE Trans Smart Grid,2019,10(5):4816-4826.
- [5] 王兴国,于溯,周泽昕,等. 新能源发电系统控制故障响应对交流线路距离保护影响分析[J]. 电网技术,2024,48(9):3834-3843.
- [6] 周泽昕,于溯,李勇,等. 新能源经柔直送出场景下功角变化导致比相式距离保护不正确动作机制分析[J]. 中国电机工程学报,2023,43(5):1730-1739.
- [7] 李彦宾,贾科,毕天姝,等. 逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(16):54-59.
- [8] 陈晓乾,秦文萍,杨乐,等. 逆变式电源接入下的配电网自适应距离保护方案[J]. 电力系统保护与控制,2023,51(11):27-38.
- [9] 马伟,黄晓波,吴旻昊,等. 一种抗过渡电阻的阻抗测量改进方案[J]. 电网技术,2020,44(3):1134-1139.
- [10] 柳焕章,周泽昕,王德林,等. 具备应对过负荷能力的距离保护原理[J]. 电网技术,2014,38(11):2943-2947.
- [11] 季亮,张林楠,姜恩宇,等. 提升距离保护适应性的新能源主动故障控制研究[J]. 太阳能学报,2022,43(7):22-29.
- [12] 康小宁,赵选宗,索南加乐,等. 输电短线路的相间自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(17):22-27,32.

(责任编辑:方素华)

(上接第 337 页)

- [6] ZHANG Y,CHENG Y,DONG X,et al. Study on the performance of new TPS high viscosity modifier on its modified asphalt [J]. In IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2020,587(1):012023.
- [7] 李霞. 橡胶粉与 TPS 复合改性沥青及排水性沥青混合料性能研究[J]. 新型建筑材料,2020,47(7):95-98,103.
- [8] WANG F,XIAO Y,CUI P,et al. Correlation of asphalt performance indicators and aging degrees:a review[J]. Construction and Building Materials,2020,250:118824.
- [9] 兰添晖,刘旭,贾存兴,等. 沥青胶结料应变延迟恢复特性的动态剪切流变试验表征[J]. 材料导报,2024,38(4):92-98.
- [10] 中国工程建设标准化协会. 公路温拌橡胶沥青混合料施工技术规程:T/CECS G:K44—01—2020[S]. 北京:人民交通出版社,2020.
- [11] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [12] NOURA S,AL-SABAEI A M,SAFAELDEEN G I,et al. Evaluation of measured and predicted resilient modulus of rubberized Stone Mastic Asphalt (SMA) modified with truck tire rubber powder[J]. Case Studies in Construction Materials,2021,15:00633.
- [13] GUI W,LIANG L,WANG L,et al. Performance evaluation of warm-mixed crumb rubber modified asphalt based on rheological characteristics[J]. Construction and Building Materials,2021,285:122881.
- [14] MA Q,GUO Z,GUO P,et al. Research on the viscosity-temperature properties and thermal stability of stabilized rubber powder modified asphalt[J]. Sustainability,2021,13(24):13536.

(责任编辑:陈雯)