

废弃PET塑料改性沥青混合料的室内性能研究

郑晓明*, 胡晓辉, 姚 阳

山西省公路局临汾分局, 山西 临汾

收稿日期: 2025年6月10日; 录用日期: 2025年7月1日; 发布日期: 2025年7月11日

摘 要

聚合物改性已被广泛用于提升沥青路面性能, 但高成本限制了其大规模应用。废弃聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)塑料作为一种低成本、可持续的添加剂, 具有良好的改性潜力。本研究评估了不同掺量废PET对沥青的改性效果, 分为改性沥青粘结剂与混合料两个阶段。通过动态剪切流变仪(DSR)和旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)分析改性的工程性能和粘弹性行为, 采用马歇尔试验和车辙试验评估混合料的力学性能。结果表明, 6%~8%的PET掺量能显著提升沥青的刚度与弹性, 其中8%掺量的混合料在稳定性与抗车辙性方面表现最佳。

关键词

改性沥青, 废旧塑料, 粘弹性性质, 马歇尔稳定度, 抗车辙性能

Laboratory Properties of Waste PET Plastic-Modified Asphalt Mixes

Xiaoming Zheng*, Xiaohui Hu, Yang Yao

Linfen Branch of Shanxi Provincial Highway Bureau, Linfen Shanxi

Received: Jun. 10th, 2025; accepted: Jul. 1st, 2025; published: Jul. 11th, 2025

Abstract

Polymer modification has been widely used to improve the performance of asphalt pavements; however, its high-cost limits large-scale application. Waste polyethylene terephthalate (PET) plastic, as a low-cost and sustainable additive, shows great potential for asphalt modification. This study evaluates the modification effects of different PET contents on asphalt, focusing on both the binder and mixture stages. The engineering properties and viscoelastic behavior of the modified binders were analyzed using a dynamic shear rheometer (DSR) and rolling thin film oven test (RTFOT).

*通讯作者。

文章引用: 郑晓明, 胡晓辉, 姚阳. 废弃 PET 塑料改性沥青混合料的室内性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1657-1665. DOI: 10.12677/hjce.2025.147178

Marshall and wheel tracking tests were conducted to assess the mechanical performance of the mixtures. The results indicate that a PET content of 6%~8% can significantly enhance the stiffness and elasticity of the asphalt binder. Among them, the mixture with 8% PET exhibited the best performance in terms of stability and rutting resistance.

Keywords

Modified Asphalt, Waste Plastics, Viscoelastic Properties, Marshall Stability, Rutting Resistance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,随着经济和工业的快速发展,塑料制品的广泛应用导致塑料废弃物产量持续增长,给环境治理带来了巨大压力[1]。如何有效回收利用废弃塑料,已成为资源再利用和环境保护领域的重要课题。聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)作为一种常见的热塑性塑料,其回收利用价值高,且在建筑、交通等领域具有广泛的应用潜力[2] [3]。将废 PET 塑料应用于沥青改性中,不仅可降低工程材料成本,还可有效减少塑料废弃物对环境的负面影响,实现资源化利用与生态效益的双重提升。

已有研究表明,塑料聚合物用于沥青改性能显著提升沥青混合料的力学性能,尤其是在抗车辙性能、刚度与耐久性方面表现突出[4] [5]。与传统商用弹性体聚合物相比,废塑料具备一定的工程性能优势及经济环保效益。马子嵘采用离析试验和动态流变试验研究四种废旧塑料(PE、PP、PVC、PS)对沥青的改性效果,分析了流变特性与相容性之间的关系,发现 PE 改性沥青具有最佳相容性[6]。王枫梳理了废旧塑料对沥青及沥青混合料高温、低温、抗老化和疲劳性能的改善作用,分析了目前存在的问题,并展望了未来沥青道路工程用废旧塑料的研究方向[7]。苏凯从废塑料材料性质、回收利用现状和道路工程应用情况等角度进行了综述并分析了其难以利用的根源;从废塑料与沥青的作用原理出发,调研与综述了废塑料、改性沥青的结构与混合料性能关系、混合料特征与常用的优化方法[8]。滕士如对外掺 PET 塑料颗粒对沥青混凝土路用性能影响开展了研究,发现外掺 PET 塑料颗粒可以提高沥青混凝土的路用性能,结合基础试验及实际工程,推荐 4% PET 塑料颗粒为最适宜掺量[9]。刘新成利用 PET 作为 SBS 改性沥青的改性剂,有效提升了 SBS 改性沥青的流变性能[10]。当前国内对废 PET 在沥青中的应用研究仍处于起步阶段,相关文献多集中于原生塑料改性,而对再生塑料、尤其是生活来源废 PET 的研究较少[11]-[13]。此外,不同掺量对改性效果的影响尚缺乏系统性实验数据支撑,对混合料长期使用性能的研究亦较为有限。

沥青混合料的耐久性主要体现在其抵抗温度变化、荷载作用以及环境老化等外部因素影响下保持结构稳定的能力[14]。已有研究指出,适量添加废塑料可改善混合料的和易性、稳定性及抗车辙能力,尤其在高温条件下的变形控制方面表现良好[15]-[17]。然而,过量掺入可能导致沥青粘结剂性能劣化,如脆性增加、低温抗裂性下降等问题[18] [19]。因此,确定合理的废塑料掺量,并系统评估其对改性沥青工程性能的影响,是推动废塑料资源化利用的关键。

基于上述背景,本研究选取生活来源的废 PET 塑料作为改性材料,通过干法掺入不同掺量的废 PET (0%、2%、4%、6%、8%)制备改性沥青,并从沥青粘结剂和混合料两个层面开展系统性能评价。采用动态剪切流变仪(DSR)与旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)测试改性沥青的高温性能及老化特性,结合马歇尔

试验与车辙试验分析混合料的力学与抗变形性能。研究旨在明确废 PET 对沥青工程性能的具体影响，探索其在路面材料中的应用可行性，为推动废塑料高值化利用与绿色道路建设提供理论依据与技术支持。

2. 试验材料和方法

2.1. 试验材料

本研究所使用的沥青为金陵 70#基质沥青，沥青的物理性能如表 1 所示。废弃塑料瓶(PET)来源于本地，经清洗后粉碎至 0.45 mm 的颗粒尺寸，用作沥青改性剂。研究所用 PET 材料如图 1 所示。沥青混合料选用典型的用于路面上面层的 AC-13 密级配沥青混合料，集料选用花岗岩。表 2 列出了所用集料的物理性能，表 3 为配合比设计集料筛分实验结果。

Table 1. Asphalt test index

表 1. 沥青试验指标

试验项目	单位	试验结果	试验规程
135℃旋转粘度	Pa·s	0.53	T0625
针入度	0.1 mm	40.2	T0604
闪点	℃	260	T0611

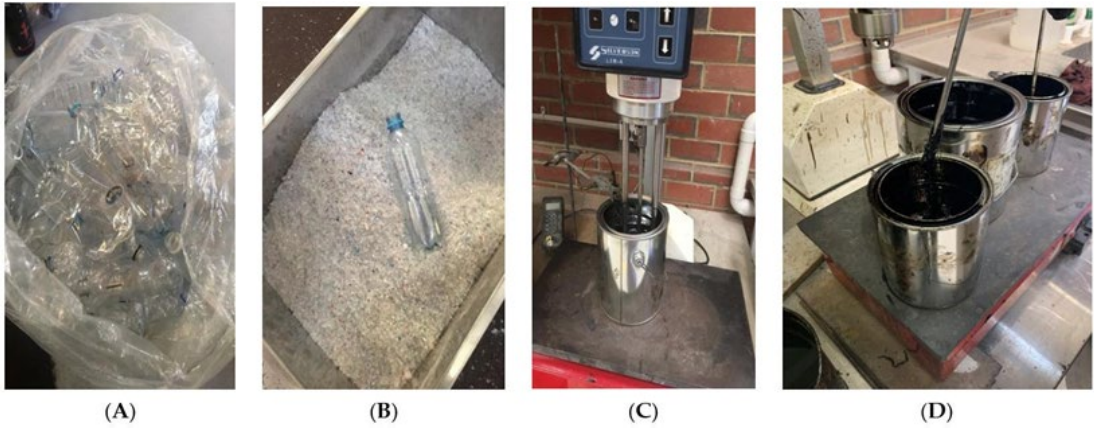


Figure 1. (A) Waste PET plastic; (B) After grinding the plastic; (C) Preparation of modified asphalt; (D) PET modified asphalt
图 1. (A) 废旧 PET 塑料; (B) 塑料研磨后; (C) 改性沥青制备; (D) PET 改性沥青

Table 2. Aggregate performance test index

表 2. 集料性能试验指标

检验项目	检验结果	技术要求	试验规程
压碎值, %	19.3	≤28	T0316
洛杉矶磨耗值, %	15.4	≤30	T0317
针片状颗粒含量, %	4.75~9.5 mm	15.7	T0312
	≥9.5 mm	7.3	
与沥青的粘附性等级	4	≥4	T0616
软弱颗粒含量, %	1.7	≤5	T0320

Table 3. Aggregate screening test results
表 3. 集料筛分试验结果

筛分尺寸(mm)	下限	上限	优选级配
19	100	100	100
13.2	90	100	93
9.5	72	83	77
6.7	54	71	62.5
4.75	43	61	53.5
2.36	28	45	35.5
1.18	19	35	28.5
0.6	13	27	20.5
0.3	9	20.	14
0.15	6	13	8.5
0.075	4	7	5

2.2. 样品制备与测试

样品制备分为两个阶段：塑料改性沥青粘结剂样品制备和塑料改性沥青混合料样品制备。

在第一阶段，通过高剪切混合工艺制备不同掺量的 PET 改性沥青样品，PET 质量占沥青的比例分别为 0%、4%、6%和 8%。结合多次预实验结果，确定最优混合工艺参数为：温度 180℃，混合时间 40 分钟，剪切转速 2000 rpm。采用动态剪切流变仪(DSR)对改性与未改性的沥青粘结剂进行测试，评估其粘弹性性能、刚度模量与弹性响应，并考察短期老化前后的抗车辙性能。为分析废 PET 改性沥青的温度敏感性，试验在 50℃、58℃、60℃、64℃和 70℃多个温度下进行。

第二阶段采用湿拌法，将改性沥青与集料混合，制备塑料改性沥青混合料。混合料中 PET 掺量控制在 4%至 8%，混合料最佳沥青用量为 4.9%。为满足区域工程要求，采用占干集料质量 1.5%的水合石灰作为矿粉填料。为全面评估 PET 对混合料性能的影响，开展了马歇尔稳定度试验、马歇尔流值试验、马歇尔指数计算以及车辙试验，分析混合料在结构稳定性与高温变形抵抗能力方面的性能表现。

3. 结果与讨论

3.1. 老化前 PET 改性沥青流变特性

为了评估沥青粘结剂的抗车辙性能，开展了动态剪切流变(DSR)试验。试验结果表明，所有 PET 改性样品均表现出良好的抗车辙性能指标，达到可接受水平。如图 2 和图 3 所示，相较于未改性的基质沥青，PET 改性沥青样品在高温(70℃)条件下表现出更高的复合剪切模量(G^*)和更大的相位角(δ)，说明其高温刚度和抗永久变形能力显著增强。改性粘结剂在高温下不易发生形变，从而提升了其抗车辙性能。

随着温度的升高，PET 改性样品仍保持较强的刚度和弹性性能，体现出良好的温度稳定性。这种性能提升归因于 PET 颗粒在沥青质相中的均匀分散和一定程度的物理膨胀效应，使得改性沥青的粘度和和易性得到改善。图中所示的 G^* 和 δ 的变化趋势进一步验证了 PET 与沥青基体之间的良好相容性，表明 PET 的加入有效增强了粘结剂的弹性和变形恢复能力。这一现象可能与 PET 在沥青中的特性及其所引发的微观结构调整密切相关，进一步支持了 PET 在改性沥青中的应用潜力。

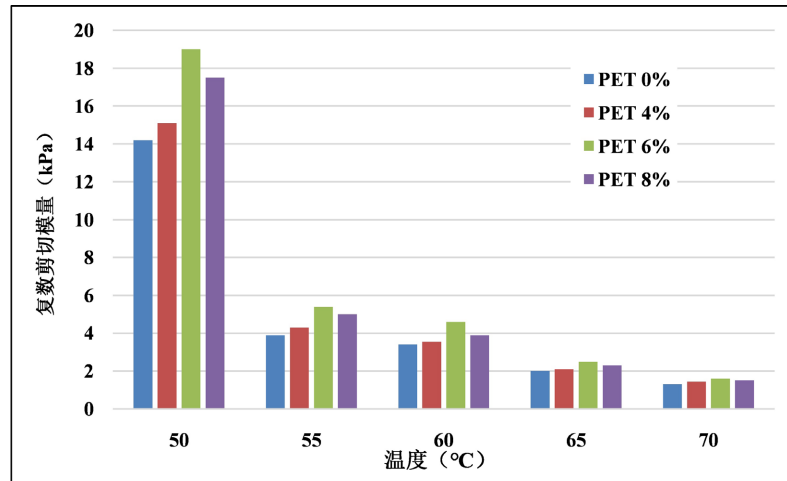


Figure 2. The complex modulus of unaged PET modified asphalt
图 2. 未老化 PET 改性沥青的复数模量

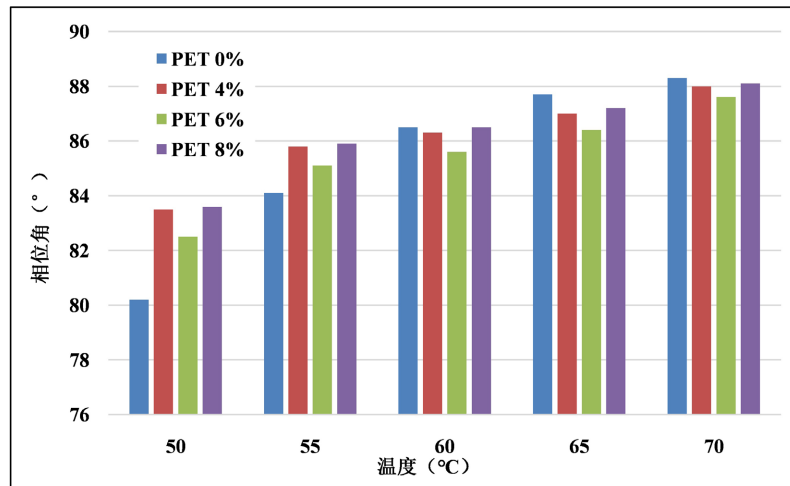


Figure 3. The phase Angle of unaged modified asphalt
图 3. 未老化改性沥青的相位角

3.2. 老化后 PET 改性沥青流变特性

图 4 和图 5 展示了不同 PET 掺量对 RTFOT 老化后沥青粘结剂粘弹性能的影响。通过动态剪切流变(DSR)测试, 在 50℃至 70℃范围内对改性沥青的复合剪切模量(G^*)与相位角(δ)进行了表征, 以评估其温度敏感性与抗老化性能。

从图 4 可见, 随着 PET 掺量的增加, G^* 值在各测试温度下均有所提高, 说明改性沥青在老化后仍保持较高的刚度, 有利于抵抗高温下的永久变形。同时, 图 5 中的相位角结果显示, 6%~8% PET 掺量显著降低了 δ 值, 相较于未改性沥青, 表现出更强的弹性响应。这一趋势表明, PET 的引入增强了粘结剂的弹性模量, 抑制了粘结剂在热氧化老化过程中的弹性退化。

此外, PET 改性沥青样品表现出更低的热氧化硬化程度, 说明其具有更优的抗老化能力。与未改性样品相比, 改性粘结剂在老化后维持了更好的柔韧性与结构稳定性, 降低了裂缝扩展和永久变形的风险。这种性能提升可归因于 PET 颗粒在沥青质中的分散作用及其对分子结构稳定性的增强, 从而改善了沥青与集料之间的黏附性与协同变形能力, 提升了材料整体的耐久性与抗裂性能。

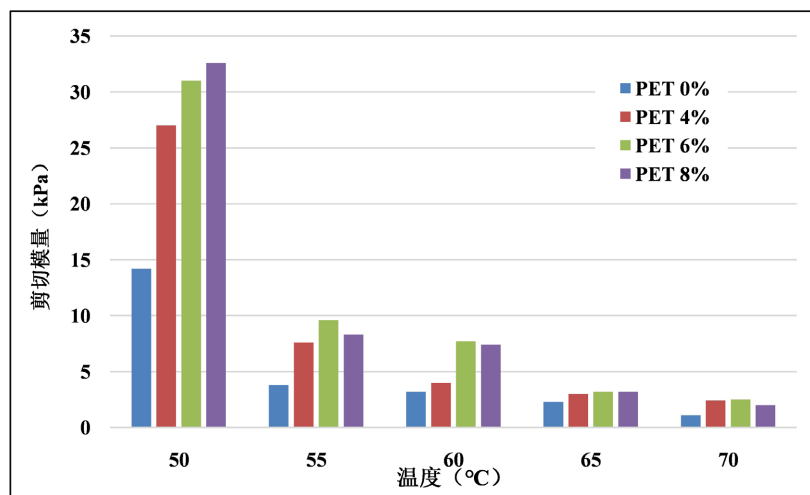


Figure 4. The complex modulus of modified asphalt after aging

图 4. 老化后改性沥青的复数模量

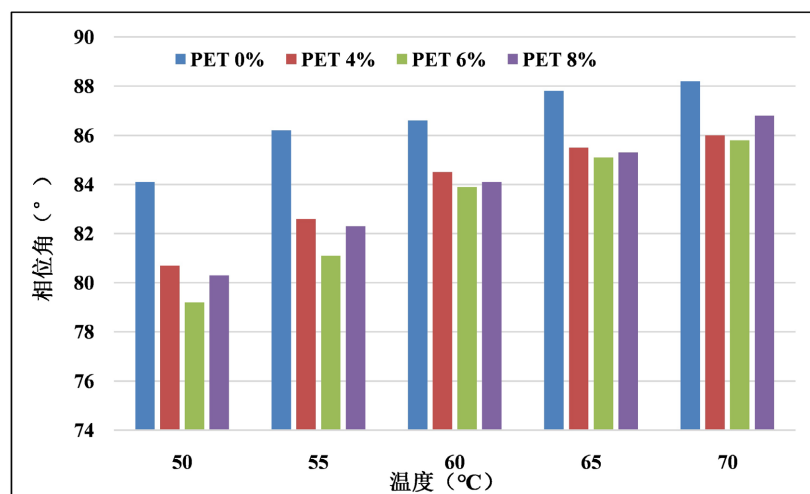


Figure 5. The phase angle of modified asphalt after aging

图 5. 老化后改性沥青的相位角

3.3. 马歇尔试验结果

马歇尔试验主要用于评估沥青混合料在重复交通荷载作用下的抗破坏与抗车辙变形能力。图 6 至图 8 分别展示了不同 PET 掺量下的马歇尔稳定性、马歇尔流值以及马歇尔商(MarshallQuotient, MQ)。

从图 6 可以看出,随着 PET 掺量的增加,混合料的马歇尔稳定性显著提高,表明塑料改性沥青具有更强的抗剪切破坏和变形能力。马歇尔稳定性作为评价沥青混合料抗变形能力的关键指标,直接反映其在承受交通荷载时的结构稳定性和抗车辙性能。图 7 显示,随着 PET 掺量的增加,混合料的马歇尔流值呈下降趋势,说明材料刚度增强,变形能力减弱。

马歇尔商(MQ)是马歇尔稳定性与流值之比,常被用于评价沥青混合料的抗车辙性能。图 8 所示结果表明,6%和8%的 PET 掺量显著提升了混合料的 MQ 值,说明其抗永久变形能力明显增强。虽然 PET 的加入对稳定性具有积极作用,但同时会导致混合料的流值降低,表现出一定的脆性趋势。该现象与已有研究结果一致。

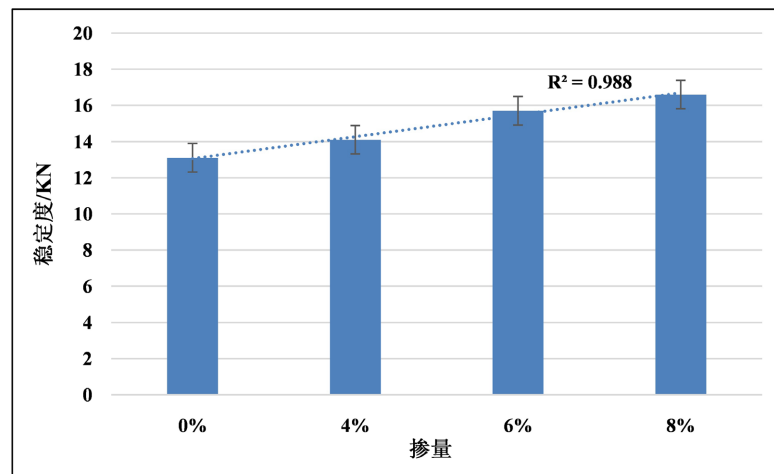


Figure 6. Marshall stability result
图 6. 马歇尔稳定度结果

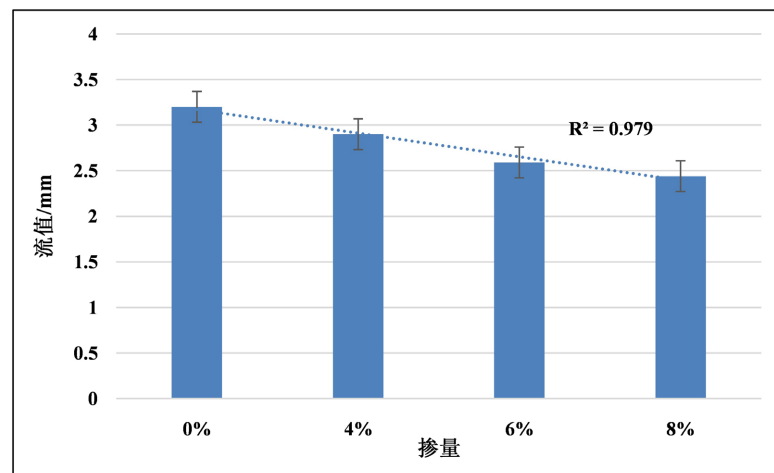


Figure 7. Flow value test results
图 7. 流值试验结果

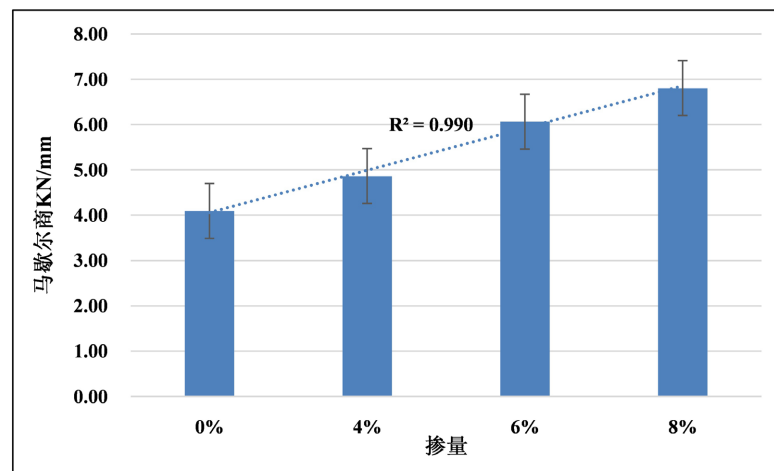


Figure 8. The result of the Marshall quotient test
图 8. 马歇尔商试验结果

PET 粒子的掺入提升了改性沥青在剪切混合过程中的分散均匀性,从而提高了混合料的整体刚度和结构完整性。这种均匀分布有效改善了骨料-粘结剂界面的黏附性,有助于增强材料的承载与抗剪性能。较高的 MQ 值进一步说明了改性混合料在高温条件下的抗车辙能力显著增强,表明其长期服役性能更优。此外,图 6~8 中的数据回归分析结果显示,马歇尔稳定性、流值和 MQ 值与 PET 掺量之间的拟合相关系数分别为 $R^2 = 0.985$ 、 $R^2 = 0.979$ 和 $R^2 = 0.988$,具有较强的相关性,验证了 PET 改性对沥青混合料力学性能提升的有效性。

3.4. 车辙试验结果

车辙是影响路面结构性能和使用寿命的主要病害之一,尤其在高温环境下更为显著。研究表明,车辙变形与沥青粘结剂对温度与应力的敏感性密切相关,尤其在使用改性粘结剂时更为复杂。因此,评估改性沥青对混合料抗车辙性能的影响对于优化路用性能具有重要意义。

车辙试验中所用数据为每种 PET 掺量下测得的三个样本结果的平均值。图 9 展示了不同 PET 掺量对混合料车辙深度的影响。与未改性的基质沥青(0% PET)相比,掺加 4%、6%和 8%废 PET 塑料的改性沥青混合料表现出更低的车辙深度,平均值分别为 8.82 mm、5.59 mm 和 3.25 mm,表明废 PET 的引入显著提高了混合料的抗永久变形能力。这一性能改善可归因于 PET 塑料与基质沥青在物理和化学特性方面的差异。在高剪切混合过程中, PET 与沥青之间可能发生化学反应和物理嵌合,改变了改性粘结剂的微观结构和颗粒分布,增强了其宏观工程性能。特别是, PET 的分子结构和其在沥青基体中的分散状态导致了材料弹性的提升。这种弹性增强可能源于分子链之间的键合作用和聚集结构的形成,从而提高了混合料在高温下抵抗剪切和压缩应力的能力

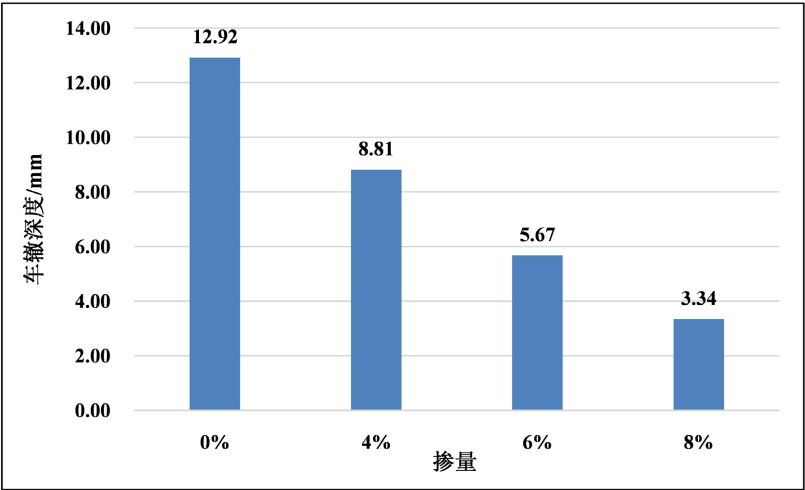


Figure 9. The influence of PET plastic content on rutting
图 9. PET 塑料含量对车辙的影响

4. 结论

在温度波动显著的环境条件下,沥青路面易受到开裂与车辙等结构性损伤:低温会导致热缩开裂,中等温度诱发疲劳损伤,而高温则易产生车辙变形。基于这一特点,通过添加外部改性剂以优化沥青混合料的组成相,可显著改善其工程性能。本研究以废聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)塑料为改性剂,通过高剪切工艺将其掺入沥青粘结剂中,从而制备改性沥青混合料。研究的主要结论如下:

(1) 动态剪切流变仪(DSR)测试结果表明, PET 改性沥青在降低沥青粘结剂高温变形敏感性方面表现

优异,显著提高了其抗车辙能力。随着 PET 掺量的增加,复合剪切模量显著升高,相位角下降,表明材料弹性增强。在 50℃~70℃测试温度范围内, PET 改性样品表现出更优的抗车辙性能。

(2) 经短期热氧化老化(RTFOT)处理后, PET 改性沥青样品仍表现出较高的剪切模量和更低的相位角,说明其具备较强的抗老化能力与较好的高温弹性。这表明 PET 添加剂可有效增强混合料在施工及服役早期阶段的耐久性。

(3) 马歇尔试验结果显示,废 PET 改性混合料具备更高的刚度和稳定性,能够更有效地抵抗重载条件下的剪切应力。相较于基质沥青混合料,对应的马歇尔稳定性值显著提高,尽管对马歇尔流量的影响较小。马歇尔商(MQ)值的升高进一步验证了改性混合料在抗永久变形性能方面的优势。

(4) 掺加 8%废 PET 的改性沥青混合料在车辙试验中表现出最佳性能,显著降低了车辙深度,提高了抗变形能力。这一结果支持了废塑料作为沥青增强材料在高温稳定性方面的潜力。

参考文献

- [1] 曾伟. 不同形态聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)塑料对沥青混合料性能的影响研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(1): 185-189.
- [2] 刘海增. 废旧聚乙烯塑料改性沥青混合料耐老化性能分析[J]. 河南科技, 2024, 51(3): 82-85.
- [3] 郭仁亮, 刘赢昌, 张国华, 等. 废旧塑料(RPE)改性沥青混合料性能优化研究[J]. 市政技术, 2024, 42(3): 171-179.
- [4] 白玉凤, 王楠楠. 废旧塑料改性沥青混合料路用性能研究[J]. 山西交通科技, 2020(2): 22-24, 35.
- [5] 王枫成. 废旧塑料在沥青道路工程中的应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(8): 225-230.
- [6] 马子嵘, 冯心峻. 不同类型废旧塑料改性沥青的流变特性及相容性分析[J]. 福建交通科技, 2025(2): 1-6.
- [7] 王枫成. 废旧塑料在沥青道路工程中的应用进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(8): 225-230.
- [8] 苏凯, 徐斌, 于晓晓. 废塑料改性沥青的研究进展[J]. 石油沥青, 2020, 34(6): 10-20.
- [9] 滕士如, 韩振峰, 魏童童. 外掺 PET 塑料颗粒对沥青混凝土路用性能影响研究[J]. 安阳工学院学报, 2024, 23(2): 84-91.
- [10] 刘新成. PET 掺量对 SBS 改性沥青流变性能的影响研究[J]. 江西建材, 2024(5): 51-53.
- [11] 符浩, 谭丁斌, 吴若权, 等. 废旧 PET 塑料改性沥青动态剪切流变性能研究[J]. 河南城建学院学报, 2024, 33(5): 31-35.
- [12] 张文才, 郝晓刚, 裴强, 等. 废弃聚乙烯、废弃聚丙烯改性沥青的研究进展[J]. 中国塑料, 2023, 37(6): 91-98.
- [13] 吴鸿飞, 蒋德晨, 高宪贺. 废弃塑料改性沥青混合料路用性能探究[J]. 中国公路, 2025(2): 110-112.
- [14] 张东旭, 么强, 黑树楠, 等. 废塑料改性沥青相容性及性能分析研究进展[J]. 化工进展, 2025, 44(3): 1651-1665.
- [15] 李琳, 胡小弟, 潘攀. 废塑料改性沥青制备工艺[J]. 中国水运, 2024, 24(20): 153-155.
- [16] 张婷婷, 茹沛泽. 回收微塑料制备改性沥青混凝土及其性能研究[J]. 塑料科技, 2024, 52(1): 28-32.
- [17] 彭勃, 唐小富. 纳米材料复合塑料改性沥青抗老化性能及其混合料路用性能研究[J]. 公路工程, 2025, 50(1): 214-220.
- [18] 杨锡武, 刘克, 何泽, 等. 生活废旧塑料改性沥青混合料的路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(2): 38-42.
- [19] 马岢言, 王斌, 韦正鹏, 等. 橡胶粉-废塑料复合改性沥青高低温性能研究[J]. 中国科技论文, 2023, 18(12): 1334-1339.