

聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青材料抗高温变形研究

Research on the Anti-High Temperature Deformation of Polyurethane and Rubber Powder Composite Modified Asphalt Materials

沈建青¹, 容七英²

(1. 青海省交通建设管理有限公司, 西宁 810000; 2. 江西龙正科技发展有限公司, 赣州 341000)

摘要: 制备聚氨酯(掺量为 5%、8%、11%)与橡胶粉复合的改性沥青试件,开展车辙试验、高温拉伸与压缩试验、高温老化性能试验,研究聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青材料抗高温变形性能。结果表明:65℃环境下,聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青稳定度较基质沥青稳定度高,且高温环境下稳定性较强;聚氨酯掺量为 8% 的复合改性沥青,在相同荷载下的压缩位移最小,在高温环境下的抗压能力更强,在高温环境下的软化点较高,针入度和延度较低,高温抗变形性能更优,能够提升沥青路面的高温稳定性,延长其使用寿命。因此聚氨酯掺量为 8% 的复合改性沥青可以作为抗高温变形材料进行路面应用。

关键词: 聚氨酯; 橡胶粉; 复合改性沥青; 高温; 抗变形性能

中图分类号: U416 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2025)05-0038-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.008

SHEN Jianqing¹, RONG Qiying²

(1. Qinghai Provincial Transportation Construction Management Co., Ltd., Xi'ning 810000, China;
2. Jiangxi Longzheng Technology Development Co., Ltd., Ganzhou 341000, China)

Abstract: Based on the prepared polyurethane (dosage: 5%, 8%, 11%) and crumb rubber composite modified asphalt specimens, rutting tests, high-temperature tensile and compressive strain tests, and high-temperature aging tests were conducted to study the high-temperature deformation resistance of the polyurethane and crumb rubber composite modified asphalt material. The results show that under 65℃ environment, the stability of polyurethane and rubber powder composite modified asphalt is higher than that of matrix asphalt, and the stability is stronger under high temperature environment; The composite modified asphalt with a polyurethane content of 8% has the smallest compression displacement under the same load, stronger compression resistance under high temperature environment, higher softening point under high temperature environment, lower penetration and elongation, and better high-temperature deformation resistance. It can improve the high-temperature stability of asphalt pavement and extend its service life. Therefore, composite modified asphalt with a polyurethane content of 8% can be used as a high-temperature deformation resistant material for road applications.

Key words: polyurethane; rubber powder; composite modified asphalt; high temperature; anti deformation performance

0 引言

沥青材料作为现代道路工程中路面结构的核心铺设介质,其高温抗变形性能直接决定了道路基础设施的使用寿命、维护成本和行车安全^[1]。在高温、多荷载等复杂环境下,传统沥青材料易出现软化、车辙等性能劣化现象,尤其在夏季高温且交通繁忙

作者简介: 沈建青(1984—),男,本科,高级工程师,研究方向:道路桥梁隧道工程。

通信作者: 容七英(1972—),女,硕士,高级工程师,研究方向:工程管理。

收稿日期: 2024-12-17

的地区更为显著。传统沥青混合料在连续高温辐射和车辆荷载的耦合作用下，容易发生软化、流动、车辙和永久变形累积等问题^[2]，进而导致路面结构损坏和维护成本增加。因此，有必要分析沥青材料的高温变形性能，将具有优异高温抗变形性能的沥青材料应用在路面中。

目前已有学者研究沥青材料高温抗变形性能，如苏银强等^[3]采用纳米 SiO₂ 对沥青进行复合改性，结果显示 NaClO 溶液为 40 mL、3 h、40 ℃，H₂O₂ 溶液为 30 mL、2 h、80 ℃，且以 FeSO₄ · 7H₂O 为催化剂时氧化效果更优；阮金奎等^[4]研究短期热氧老化前后不同质量比木质素改性沥青的高温蠕变性能，结果表明木质素改性沥青在高温下黏弹性减弱，不可恢复弹性变形性能上升，沥青向非线性流变演变；Bhat 等^[5]采用三种不同比例的纳米 Al₂O₃ 对沥青粘合剂进行改性，结果表明纳米 Al₂O₃ 改性粘合剂累积永久变形的倾向极低，提升了沥青的疲劳性能；黄峰等^[6]向 SBS 沥青中添加了适量的易密实添加剂，改善了 SBS 沥青老化前后的变形恢复能力及应力敏感性；张争奇等^[7]基于复合改性技术制备 SBS - PE 和 CR - PPA 两种高聚物复合改性高模量沥青，利用流变学试验评价了其高温、低温和抗疲劳性；冯飞鹏等^[8]以高掺量胶粉 - SBS 复合改性沥青为对象，探

究沥青的高温流变性能，高掺量胶粉 - SBS 复合改性沥青高低温性能随胶粉掺量增加而增大，胶粉掺量 42% 时可同时满足性能与施工要求。

以上研究成果未验证沥青材料在持续高温 - 紫外耦合老化条件下长期抗变形性能。而现有研究结果显示，聚氨酯和橡胶粉是当前沥青改性领域的代表性聚合物功能材料^[9-11]，通过化学改性机理和物理共混对沥青基质的性能具有不同的控制作用^[12-13]。聚氨酯具有优异的弹性和耐磨性，能够有效提高沥青的韧性和耐久性；橡胶粉则具有良好的弹性和黏附性，能够显著改善沥青的低温抗裂性和抗老化性能^[14-15]。鉴于此，提出聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青材料高温抗变形性能研究。将聚氨酯弹性体与橡胶粉颗粒共混改性 70# 沥青材料，采用车辙试验、高温压缩、拉伸及紫外耦合老化的掺量梯度试验，分析材料的长短期高温抗变形性能，确定聚氨酯和橡胶粉在高温区的最优配比。

1 试验材料与方法

1. 1 原材料

以 70# 沥青、橡胶粉、聚氨酯弹性体、相容剂和稳定剂为原材料。70# 道路石油沥青技术指标、橡胶粉技术指标、聚氨酯弹性体技术指标分别见表 1 ~ 3。

表 1 70#道路石油沥青技术指标
Table 1 Technical specification for 70# road petroleum asphalt

类别	针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s) /0.1 mm	延度 (10 ℃, 5 cm/min) /cm	软化点 (环球法) /℃	运动黏度 (135 ℃) / (Pa · s)	闪点/℃	溶解度 /%	密度 (25 ℃) /(g/cm ³)	蜡含量 /%	TFOT 质量损失 (163 ℃) /%
规范要求	≥50	≥20	≥45	≥1. 5	≥240	≥99	≥0. 8	≤3	≤1
实测值	65	25	48	1. 8	245	99. 5	1. 03	2. 8	0. 8

表 2 橡胶粉技术指标
Table 2 Technical specification of rubber powder

水分/%	相对密度	金属含量/%	纤维含量/%	灰分/%
0. 73	1. 17	0. 01	0. 14	<6. 8

表 3 聚氨酯弹性体技术指标
Table 3 Technical specification for polyurethane elastomers

密度 / (g/cm ³)	硬度 /A	拉伸强度/MPa	断裂拉伸率/%	弯曲模量 /MPa	压缩变形率/%	低温脆点 /℃
1. 23	95	52	455	289	25	<- 65

1. 2 复合改性沥青材料制备

设计橡胶粉的掺量为沥青材料的 12%，聚氨酯掺量分别为 5%、8% 和 11% 制备试样。先将 70# 道路石油沥青放入可控温电炉内，设置可控温电炉内温度为 180 ℃，待其至融溶状态，将橡胶粉分批缓

慢加入，此时将可控温电炉温度升高至 200 ℃，使沥青与橡胶粉混合均匀，将混合液体倒入剪切机内剪切 90 min。然后再添加聚氨酯、相容剂和稳定剂进行混合和剪切，剪切 60 min 后，再送入烘箱，加热到 150 ℃，加热 3. 5 h，得到聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青，试件尺寸为 400 mm × 400 mm × 40 mm，基质沥青试件标记为 G。

1. 3 高温抗变形性能试验方法

车辙试验：将制备好的试件放置在车辙试验机上，设置试验温度为 65 ℃，车辙轮压为 0. 65 MPa，往返碾压速度为 40 次/min。

高温拉伸与压缩试验：设置 MTS - 810 试验系统

材料科学

环境温度 为 65 ℃，压缩和拉伸速率为 1.2 mm/min，进行拉伸与压缩试验。

高温老化性能试验：复合改性沥青试件放置在紫外线光照设备内，设置高温光照老化时间为 200 h，温度为 65 ℃。高温光照老化后，将试件加热至流动状态，将针入度测试器插入聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青试件中，获取针入度数值。

2 试验结果与分析

2.1 车辙试验

对复合改性沥青稳定性进行试验，得到复合改性沥青稳定度试验结果见表 4。

表 4 复合改性沥青稳定度试验结果

Table 4 Stability test results of composite modified asphalt

试件名称	聚氨酯掺量/%	动稳定度 (次/mm)
G-0		5762.75
G-5	5	6522.25
G-8	8	9639.00
G-11	11	7424.25

基质沥青试件 G-0 的稳定度最低，掺有聚氨酯复合沥青的动稳定度均高于基质沥青 G-0，其中聚氨酯 8% 掺量的复合改性沥青的动稳定度最高。说明在高温环境下，在基质沥青内添加适量的聚氨酯和橡胶粉后，动稳定度提高。当聚氨酯含量达到 8% 时，复合改性沥青的动稳定度最佳。分析以上试验结果形成的机理如下：聚氨酯作为一种高分子弹性体，具有优良的力学性能和较高的耐热性能，其分子链包含软段和硬段，硬段赋予材料较高的强度和模量，软段则具有良好的韧性和延展性，能够在荷载作用下有效吸收应力并分散应变。当聚氨酯掺入基质沥青后，在加热和剪切作用下，与沥青中的极性组分发生物理交联和部分化学反应，形成空间网状结构，这种结构能够限制沥青分子运动，提高体系的结构黏度，从而抑制高温下的流动变形。橡胶粉含有交联的三维网络结构和不饱和烃链，在高温条件下可通过吸收沥青中的轻组分发生溶胀，从而增加自身体积并在沥青体系中形成弹性填充骨架，既能提高沥青的弹性恢复能力，又能有效降低温度敏感性。聚氨酯与橡胶粉融合后，橡胶粉溶胀后提供粗糙的颗粒界面，增加了聚氨酯与沥青的结合界面面积，提高了相间黏附力，减少了加载过程中结

合料与集料间的剥离趋势；聚氨酯的硬段与橡胶粉的交联结构相互作用，可进一步增强复合体系的整体模量和抗流动能力。当聚氨酯含量较低时，改性作用不足，形成的空间网状结构不够完善，不足以大幅提升动稳定度；随着聚氨酯含量的增加，沥青基体连续相中的聚氨酯结构逐渐增多，与橡胶粉的协同作用更加明显，沥青的黏弹性和高温抗形变能力显著增强；但当掺量过高时，由于聚氨酯在体系中的比例过大，可能导致材料的相态分离加剧，内部应力分布不均，反而会引起结合料脆性增加或施工性能下降。因此，8% 的聚氨酯掺量能够在结构增强与相容性之间达到相对最佳平衡点，使得改性沥青在高温环境下既具有较高的模量和强度，又保持一定的韧性与延展性，从而有效抵抗车辙形成。

2.2 高温压缩与拉伸试验

对复合改性沥青材料进行高温拉伸与压缩试验，得到沥青在不同荷载位移和高温位移的试验结果如图 1 所示。

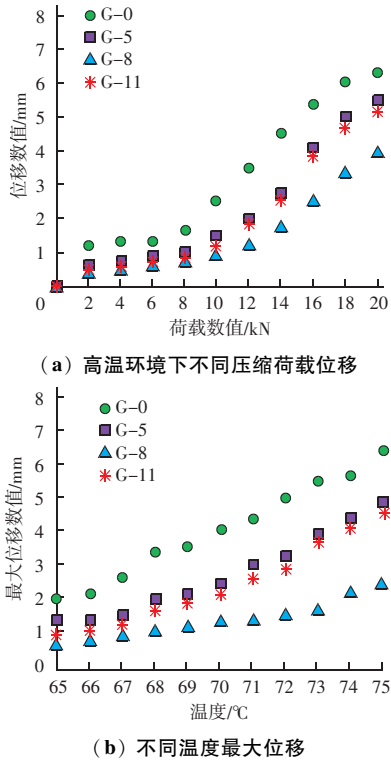


图 1 沥青在不同荷载位移和高温位移的试验结果
Fig. 1 Experimental results of asphalt under different load displacements and high temperature displacements

随着荷载数值的逐步增大，各试件的压缩位移也相应增加。在荷载数值低于 10 kN 的初期阶段，四

种沥青试件的压缩位移均保持在较低水平。这是因为在初始应力区间内，沥青材料依然能够保持较强的结构完整性与弹性恢复能力。然而随着荷载不断增加，沥青结合料逐渐由弹性主导区过渡至黏塑性变形区，表现为位移不断累积，直至稳定度逐渐变化。相比基质沥青，添加了聚氨酯的复合改性沥青试件表现更为优异，可以显著提高沥青试件在高温环境下的抗压缩性能。其中，G-8 试件在相同荷载下的压缩位移数值最低，这表明其在高温环境下具有较强的抗压缩能力，有助于改善道路材料性能、提升路面结构稳定性。对比不同材料类型，在掺入聚氨酯与橡胶粉的复合改性沥青中，压缩位移显著减小，这反映了其内部结构在高温与荷载作用下的稳定性得到明显增强。聚氨酯分子链中硬段与软段的共存，使其在受力过程中既能提供高模量支撑，又能吸收与缓解外部应力冲击，与沥青中的极性基团发生相互作用后形成三维网络结构，有效抑制了沥青分子的大尺度流动；橡胶粉则通过吸收沥青轻组分发生溶胀，起到填充与支撑作用，增强材料的黏弹性，使得体系在高温下依然保持较高的抗压缩性能。特别是在聚氨酯掺量为 8% 时，材料的内部结构达到最佳匹配。其机理与动稳定度一致。

随着温度的升高，不同沥青试件的最大位移均呈现出增加的趋势，这一现象符合沥青材料温度敏感性特征。在相同的环境温度下，基质沥青的最大位移相对较大；G-5 和 G-11 在高温下的表现则更为稳定，位移要小；G-8 在相同温度下最大位移最小。结果表明，当聚氨酯的掺量为 8% 时，聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青在高温环境下的稳定性最佳。

从以上试验结果可以看出，聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青，在高温环境下抗压性能和高温稳定性方面都有明显提升；聚氨酯掺量为 8%，复合改性沥青能够在高温环境下保持较好的性能。8% 聚氨酯掺量使复合改性沥青在力学性能、结构均匀性与相容性方面实现了最优平衡，使其在高温荷载下的压缩位移最小，从而表现出最佳的抗压缩能力和路用稳定性。适量聚氨酯与橡胶粉的协同改性能够显著提升沥青材料的高温性能，改善道路使用寿命与安全性，而 8% 这一比例恰好处于力学增强与施工可行性之间的最佳临界点。

2.3 高温老化性能试验

表 5 为环境温度为 65 ℃ 时，不同沥青试件的软化点、针入度和延度结果。

表 5 不同沥青试件的软化点、针入度和延度数值
Table 5 Softening point, penetration, and ductility values of different asphalt specimens

沥青试件名称	软化点/℃	针入度/0.1 mm	延度/cm
G-0	79.5	79.5	68.2
G-5	84.3	73.6	63.4
G-8	89.6	72.7	56.9
G-11	85.1	74.5	60.8

聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青材料软化点较基质沥青有所提升，表明高温稳定性得到增强；同时，针入度和延度指标则有所下降，反映出材料在低温可塑性和延展性方面存在一定程度的降低。说明复合改性沥青在高温环境下的抗软化和抗针入能力更佳，结构稳定性显著增强。而 G-8 沥青在这三个指标上的表现最为优异，软化点最高，针入度和延度最低，说明了聚氨酯掺量为 8%，在高温环境下具有最强的抗变形能力。聚氨酯掺入沥青提升了其软化点，橡胶粉增强了复合体系的黏弹性和抗流动性。针入度的降低反映了复合改性沥青在常温下硬度增加，这是因为聚氨酯网络和橡胶粉填充使得沥青基体的结构更加紧密和坚韧，沥青质的相对运动受到限制，导致整体材料表现为较低的针入深度。延度下降则说明了沥青在拉伸状态下的延展性减弱，其原因在于聚氨酯的交联网络提高了材料的模量，使得结合料在低温或拉伸状态下不易被拉长，分子链的滑移和重排受限，从而降低了延展性能。尽管延度的降低意味着柔性减弱，但从道路工程应用角度看，这种变化是可以接受的。8% 聚氨酯掺量既可以提高软化点和稳定性的效果，又避免了聚氨酯掺量过高时出现的脆性增强问题，聚氨酯能够充分发挥增强作用，使沥青材料在高温下具备最强的抗变形性能。

3 结论

制备聚氨酯与橡胶粉复合改性沥青材料，研究其高温抗变形性能，得到以下主要结论：

(1) 掺入 12% 橡胶粉形成刚性网络结构，有效抑制沥青高温流动，掺入 8% 聚氨酯通过 -NHCOO- 键与沥青分子交联，提升弹性恢复率，二者协同使

材料科学

材料在高温下提升了动稳定度。

(2) 当聚氨酯的掺量为 8% 时, 有相同荷载下的压缩位移数值最低; 聚氨酯和橡胶粉复合改性沥青在 65 ℃ 以上高温环境下最大位移最小, 材料稳定性最佳。

(3) 聚氨酯的掺量为 8% 时, 复合改性沥青软化点最高, 针入度和延度最低, 抗高疲软变形能力最强。

因此以 70#道路石油沥青为基质材料, 加入 12% 橡胶粉和 8% 掺量的聚氨酯制备复合改性沥青为最优配比。现有老化测试仅针对紫外条件, 未来研究可增加冻融循环、水损害等多因素耦合试验以全面评估沥青材料的长期性能, 从而促进该材料在复杂环境道路工程中的规模化应用。

参 考 文 献

[1] 吕珩. 不同老化条件下粉煤灰沥青混合料路用性能评价 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 156–159, 168.

[2] 王莉静, 孙泽然, 李志猛, 等. 改进 YOLOv5 的沥青路面裂缝检测方法 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2024, 41 (3): 67–7379.

[3] 苏银强, 刘玉梅, 汪国贤, 等. 表面氧化胶粉-纳米 SiO₂ 复合改性沥青性能研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (3): 1–8, 29.

[4] 阮金奎, 付鑫, 饶应军, 等. 基于多应力蠕变恢复评价木质素改性沥青高温性能 [J]. 应用化工, 2023, 52 (1): 17–21, 27.

[5] BHAT F S, MIR M S. Evaluating the rheological performance of

bituminous binder containing nano Al₂O₃. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34 (2), 04021448–04021463.

[6] 黄峰, 杨波, 郝增恒, 等. 基于 MSCR 试验对老化前、后的易密实改性沥青高温性能研究 [J]. 公路, 2023, 68 (8): 308–312.

[7] 张争奇, 郑文章, 桂增俭, 等. 高聚物复合改性高模量沥青的流变性能与改性机理 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41 (1): 51–57.

[8] 冯飞鹏, 范昭, 王明洁, 等. 高掺量胶粉-SBS 复合改性沥青的高温流变性能 [J]. 中国科技论文, 2024, 19 (5): 615–620.

[9] 崔灿, 韩光明, 刘倩, 等. 高耐候聚氨酯/TiO₂-水泥复合防水涂料的制备及性能研究 [J]. 涂料工业, 2025, 55 (4): 54–59.

[10] 王知乐. 聚氨酯改性乳化沥青冷拌重复再生集料路面修补料的试验研究 [J]. 科技通报, 2025, 41 (1): 74–78.

[11] 王威, 段丹军, 张波, 等. 不同橡胶粉灰分分析与改性沥青效果研究 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2025, 44 (2): 75–81.

[12] 张增平, 王力, 朱友信, 等. 多亚甲基多苯基多异氰酸酯 (PAPI) 型聚氨酯改性沥青的流变性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2023, 41 (2): 235–240.

[13] 王国青. 聚氨酯改性沥青及混合料性能试验研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2022, 44 (8): 26–30.

[14] 覃金顺, 王振军, 孙宁, 等. 橡胶粉对沥青灌缝胶高温稳定性提升与机理 [J]. 公路, 2023, 68 (8): 332–340.

[15] 夏慧芸, 杨浩田, 卢昌杰, 等. 复合改性沥青密封胶的组成优化及性能研究 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2023, 51 (6): 136–145.

