TOR/胶粉复合改性沥青的高温流变性能研究

祁 文[1],马福才[2],马有彪[2],朱晨旭[3],常明丰[3]*

(1.青海省交控建设工程集团有限公司,青海 西宁 810000;2.青海省果洛公路工程建设有限公司,青海 西宁 810000;3.长安大学材料科学与工程学院,陕西 西安 710018)

摘 要:以SK90#基质沥青为原料,分别掺入20%的胶粉(CR)和塑化胶粉(PCR),并添加一定的橡胶沥青连接剂(TOR),制备4种改性沥青试样,研究TOR对CR沥青与PCR沥青高温流变性能的影响。利用傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)验证连接剂的作用机理,采用动态剪切流变仪(DSR)对改性沥青试样进行温度扫描和多重应力蠕变恢复(MSCR)试验,系统评价不同改性沥青试样的高温流变性能。结果表明:TOR与CR、沥青形成硅氧键桥接结构,提高CR与沥青的相容性。在不同改性沥青试样中,CR沥青具有更高的复数模量(G^*)和车辙因子($G^*/\sin\delta$),表现出更加优异的高温性能。而CR经过塑化后,在40~90 ℃的温度下,G^*的劣化率分别为15.7%、20.3%、26.4%、35.6%、42.1%和45.5%,相位角(δ)提升率分别为5%、8.7%、12.8%、13.7%、11.3%和8.9%,TOR的加入能够改善PCR沥青的高温性能。其中,4种沥青的$G^*/\sin\delta$随着温度变化呈现出相同趋势。MSCR试验结果表明,在CR体系中,TOR的加入提升抗蠕变能力,在PCR体系中改善效果不显著。基于响应曲面法的分析结果表明,CR改性沥青在高温下具有更优的综合性能,因此更适用于高温服役环境。

关键词:道路工程;胶粉改性沥青;TOR;高温流变性能;响应曲面

中图分类号:TQ330.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0090-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.016

Study on High-temperature Rheological Properties of TOR/Crumb Rubber Composite Modified Asphalt

QI Wen[1], MA Fucai[2], MA Youbiao[2], ZHU Chenxu[3], CHANG Mingfeng[3]*

(1. Qinghai Traffic Control Construction Engineering Group Co. , Ltd. , Xining 810000, China; 2. Qinghai Guoluo Highway Engineering Construction Co. , Ltd. , Xining 810000, China; 3. School of Material Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China)

Abstract: Using SK90# base asphalt as the raw material, four modified asphalt samples were prepared by incorporating 20% crumb rubber (CR) and plasticized crumb rubber (PCR), respectively, along with a certain amount of rubber asphalt coupling agent (TOR). The effects of TOR on the high-temperature rheological properties of CR asphalt and PCR asphalt were investigated. The mechanism of the coupling agent was verified using Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), while temperature sweep and multiple stress creep recovery (MSCR) tests were conducted on the modified asphalt samples using a dynamic shear rheometer (DSR) to systematically evaluate their high-temperature rheological performance. The results indicated that TOR formed silicon-oxygen bond bridging structures with CR and asphalt, enhancing the compatibility between CR and asphalt. Among the different modified asphalt samples, CR asphalt exhibited higher complex modulus (G^*) and rutting factor ($G^*/\sin\delta$), demonstrating superior high-temperature performance. After plastication of CR, the degradation rates of G^* at temperatures ranging from 40 ℃ to 90 ℃ were 15.7%, 20.3%, 26.4%, 35.6%, 42.1%, and 45.5%, respectively, while the phase angle (δ) improvement rates were 5%, 8.7%, 12.8%, 13.7%, 11.3%, and 8.9%, the addition of TOR improved the high-temperature performance of the PCR asphalt. The $G^*/\sin\delta$ of the four asphalts exhibited the same trend with temperature variation. MSCR test results demonstrated that in the CR

收稿日期Submitted date 2026-01-19;修回日期Revised date 2026-02-26;录用日期Accepted date 2026-03-24

基金项目:青海省交控建设工程集团有限公司科研项目(JGJT-20250822-01)

*联系人,mfchang99@126.com

引用本文:祁文,马福才,马有彪,等.TOR/胶粉复合改性沥青的高温流变性能研究[J].塑料科技,2026,54(8):90-94.

Citation:QI W, MA F C, MA Y B, et al. Study on high-temperature rheological properties of TOR/crumb rubber composite modified asphalt [J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 90-94.

system, the addition of TOR enhances creep resistance, while the improvement effect was not significant in the PCR system. Analysis based on the response surface methodology indicates that CR asphalt exhibited superior overall performance at high temperatures and was therefore more suitable for high-temperature service environments.

Keywords: Road engineering; Crumb rubber modified asphalt; TOR; High-temperature rheological properties; Response surface methodology

沥青路面在高温下易出现车辙、裂缝等病害[1-3]，严重影响沥青路面服役寿命与行车安全。沥青作为沥青混合料中的关键组分，显著影响沥青混合料的高温性能[4]。因此，探究沥青的高温性能是当前沥青路面材料研究的方向之一。

近年来，废旧轮胎数量显著增加[5]，作为一种可重新利用资源，研究人员将其作为外掺剂加入沥青中。林卓立[6]采用高掺量胶粉/苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(CR/SBS)制备复合改性沥青。结果表明，CR/SBS复合改性沥青的高温抗车辙性能优于SBS改性沥青。由于其黏度较高，施工过程中需要适当升高温度，以改善流动性。韦万峰等[7]利用废旧胶粉(CR)改善沥青的路用性能，探究CR与沥青的作用机理，发现CR与沥青的相容性是影响其他掺量的关键因素。因此，为提升CR与沥青的相容性，研究人员对相关改善手段进行研究。范杰强等[8]采用超声波脱硫技术处理废胎胶粉并将其掺入沥青。结果表明，膨化活性CR的掺入能够增大沥青的软化点，显著改善高温性能。杨林正等[9]利用低温脱硫技术对CR进行活化，发现活化技术能够破坏CR内部化学键，增强与沥青的相容性。穆建青[10]将橡胶沥青连接剂(TOR)掺入CR改性沥青体系，探究TOR对其性能的影响。结果表明，随着TOR掺量的增加，CR沥青的性能得到显著提升。此外，流变性能常被用作评价沥青高温性能的关键指标。王菊山等[11]利用温度扫描试验探究不同活化方式对CR改性沥青的高温性能的影响。结果表明，微波与化学活化适用于高温性能需求，干挤出活化在提升低温抗裂性能上优势更加显著。刘玉梅等[12]利用复数剪切模量(G^*)、相位角(δ)、车辙因子($G^*/\sin\delta$)作为评价指标，分析CR改性沥青及CR/碳纳米管复合改性沥青的高温性能。结果表明，CR显著改善沥青的高温稳定性，碳纳米管的加入进一步提升其高温性能，碳纳米管的长径比对CR改性沥青的高温性能存在影响。在CR改性沥青混合料方面，王永宁等[13]制备活化CR复合改性沥青混合料，发现双螺杆活化的CR/SBS复合改性沥青混合料具有突出的高温性能。孙强等[14]以脱硫CR为主要改性剂，基于脱硫技术得到脱硫CR-多聚磷酸复合改性高模量沥青，利用车辙试验对其混合料路用性能进行探究。结果表明，该沥青混合料的高温性能优异。综上所述，CR的加入能够改善沥青及沥青混合料的高温性能。

目前，关于TOR对CR和塑化胶粉(PCR)复合改性沥青高温性能的研究尚不充分。因此，本研究选择SK90#基质沥青，以CR和PCR作为改性剂，同时添加TOR增强相容性，制备4种沥青试样。文章探讨CR、PCR和TOR与基质沥青的作用机理，评价4种改性沥青的高温性能，以期为高性能CR改性沥青的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

基质沥青，SK90#，青岛日石吉通沥青有限公司，表1为基质沥青的技术指标，其中RTFOT代表旋转薄膜烘箱试验；CR，60目，长春宏达橡胶制品厂；PCR，由60目的CR经常压塑化处理制备；TOR，赢创资源效率有限公司。

表1 基质沥青的技术指标

Tab.1 Technical specifications of base asphalt

技术指标	实测值	规范要求
黏度(135 ℃)/mPa·S	594	
针入度(25 ℃，5 s，100 g)/0.1 mm	89.8	80.0~90.0
延度(15 ℃，5 cm/min)/cm	>100	≥100
软化点(R&B)/℃	44.6	≥42.0
RTFOT后针入度25 ℃/0.1 mm	48.5	
RTFOT残留物针入度比/%	54.0	≥50.0
RTFOT后软化点/℃	50.1	
RTFOT残留物软化点增值/℃	5.5	
RTFOT质量变化/%	0.4	≤±0.8

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，iS5，美国赛默飞世尔科技公司；动态剪切流变仪(DSR)，Smart Pave 102e，安东帕流变仪公司；高速剪切机，HLA，纳智达(上海)纳米技术有限公司。

1.3 样品制备

CR与PCR掺量均为基质沥青质量的20%，TOR的掺量为CR质量的5%。首先，将基质沥青加热至180 ℃，依次加入CR或TOR，以500 r/min的速率进行搅拌，直至CR和TOR混合均匀。随后在180 ℃、5 000 r/min条件下高速剪切45 min，最后将复合改性沥青置于180 ℃烘箱中发育45 min。

1.4 性能测试与表征

FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪对改性沥青进行测试。波数范围4 000~400 cm^{-1}。

流变性能测试：采用动态剪切流变仪对改性沥青进行

温度扫描和多重应力蠕变恢复(MSCR)试验，得出G^*、δ、0.1 kPa和3.2 kPa应力水平下的应变，计算$G^*/\sin\delta$。

2 结果与讨论

2.1 改性沥青的FTIR分析

红外光谱测试能够结合每种官能团相应的振动频率范围[15-16]，观察分析红外光谱中的特征峰强度、位置等，阐释材料的构成[17-18]。图1为改性沥青的FTIR谱图。从图1可以看出，所有试样均在2 920 cm^{-1}和2 850 cm^{-1}处出现强吸收峰，属于C═C、C—C的伸缩振动。在1 600 cm^{-1}处出现改性沥青的特征峰，其强度明显大于基质沥青，证明CR和PCR已掺入沥青体系。而TOR在900 cm^{-1}处出现极强的特征峰，归因于Si—O—Si的伸缩振动。该特征峰是该类有机连接剂的标志。当TOR加入CR沥青体系后，在该波数附近产生更为明显的特征峰，表明TOR成功引入CR改性沥青中。该连接剂借助硅氧键在沥青与CR之间形成桥接，进而提升CR的相容性。

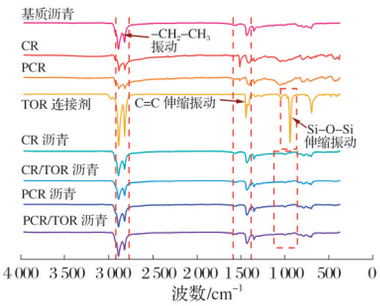


图1 改性沥青的FTIR谱图

Fig.1 FTIR spectra of modified asphalt

2.2 改性沥青的高温流变性能分析

本研究分别在40、50、60、70、80、90 ℃条件下以改性沥青的G^*、δ和$G^*/\sin\delta$作为评价指标，分析改性沥青的高温流变性能。G^*与δ为表征沥青黏弹性行为的基本参数[19-21]，而$G^*/\sin\delta$用于评价沥青的高温性能[22-23]。图2为改性沥青的温度扫描试验结果。

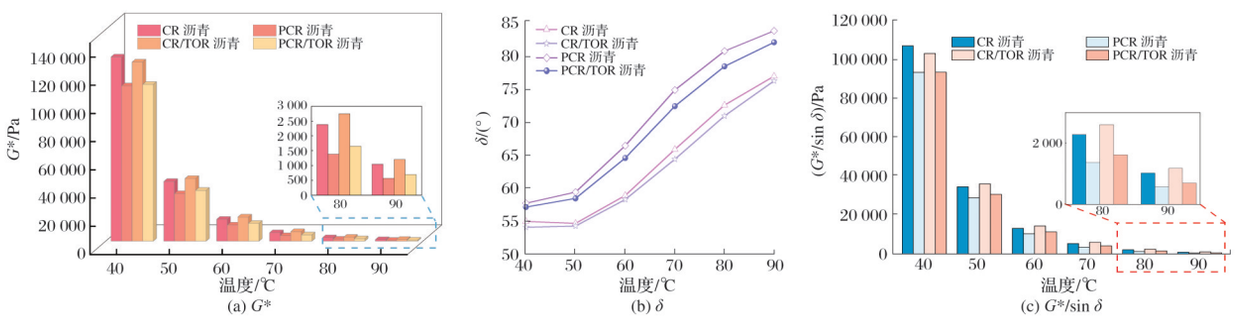


图2 改性沥青的温度扫描试验结果

Fig.2 Temperature sweep test results of modified asphalt

从图2可以看出，4种改性沥青的G^*和$G^*/\sin\delta$均随着温度的升高而降低，而δ则呈现出相反趋势，这表明温度是影响其变化程度的关键因素。CR经过塑化后，在40~90 ℃的温度范围内，G^*的劣化率$[(G_{CR}^*-G_{PCR}^*)/G_{CR}^*]$分别为15.7%、20.3%、26.4%、35.6%、42.1%和45.5%，而加入TOR后G^*的劣化率分别为12.6%、18.8%、26.1%、34.1%、40.0%和42.2%；δ的提升率$[(\delta_{PCR}-\delta_{CR})/\delta_{CR}]$分别为5.0%、8.7%、12.8%、13.7%、11.3%和8.9%，而加入TOR后δ的提升率分别为5.7%、7.7%、10.8%、12.5%、10.6%和7.7%。结果表明，TOR借助自身大分子优势对劣化程度产生一定的修复作用，结合图2b可以看出，TOR增加沥青中黏性组分比例，从而改变CR沥青的变形抵抗能力，说明TOR在沥青中并非发挥单一的改性功能。在40~90 ℃的温度范围内，两种CR沥青的$G^*/\sin\delta$均大于两种PCR沥青，在大于60 ℃的高温条件下，差异更加明显。

图3为改性沥青的$G^*/\sin\delta$变化率。从图3可以看出，随着温度的逐渐升高，PCR沥青相对CR沥青$G^*/\sin\delta$变化率从12.8%升至44.4%，表明PCR沥青具有更高的刚度和更加优异的高温抗车辙能力。然而，在复掺TOR后，两种改性沥青之间的高温性能差异同样减小。向CR沥青中加入TOR后，其G^*和$G^*/\sin\delta$在大于50 ℃时均提升，再次证明TOR自身的大分子结构会在一定程度上提升CR沥青的劲度，PCR沥青在掺入TOR后呈现出同样的变化趋势。

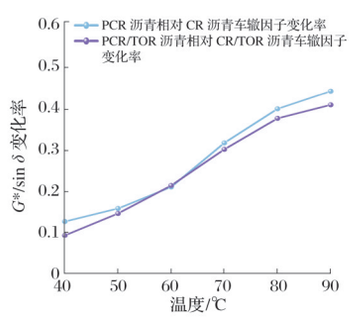


图3 改性沥青的$G^*/\sin\delta$变化率

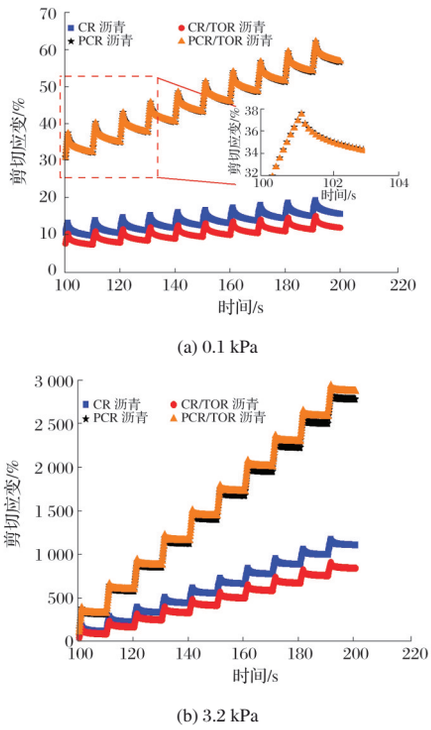
Fig.3 Variation rate of $G^*/\sin\delta$ for modified asphalt

2.3 改性沥青的MSCR分析

采用0.1 kPa与3.2 kPa两级加载应力水平，在64 ℃条件下探究不同应力水平对沥青高温性能的影响[24-26]。图4为0.1 kPa与3.2 kPa下改性沥青的MSCR曲线。从图4可以看出，随着加载时间的延长，4种改性沥青的剪切应变均呈现逐渐增大的趋势。在高应力水平下，试

样的累计应变显著高于低应力水平，表明CR沥青的性能对外界荷载具有显著的依赖性，其蠕变行为呈现非线性特征。从图4a可以看出，在0.1 kPa应力水平下，CR沥青和CR/TOR沥青的累计剪切应变随加载时间的变化程度较小，证明两种改性沥青的刚度较大，在高温下具有优异的抵抗变形能力，其中CR/TOR沥青抗剪切性能得到进一步改善。此外，PCR沥青和PCR/TOR沥青的曲线近似重合，整体抗变形能力相似。从图4b可以看出，在3.2 kPa应力水平下，4种改性沥青的剪切应变差异增大，特别是加载时间后期。其中，CR/TOR沥青在整个试验过程中始终维持最低的累积应变，证明其抗剪性能最为优异。在CR改性沥青中加入TOR，能够提升CR改性沥青在高温下的抗蠕变能力，但并未对PCR改性沥青产生明显改善作用。

综上所述，CR/TOR沥青在不同应力水平下均呈现出最优的高温抗蠕变特性。相较之下，在3.2 kPa应力水平下，PCR沥青抗蠕变性能发生显著劣化，且该劣化行为随加载时间的延长而加剧。加入TOR能够有效改善CR沥青在高应力下的应变累积。



(a) 0.1 kPa

(b) 3.2 kPa

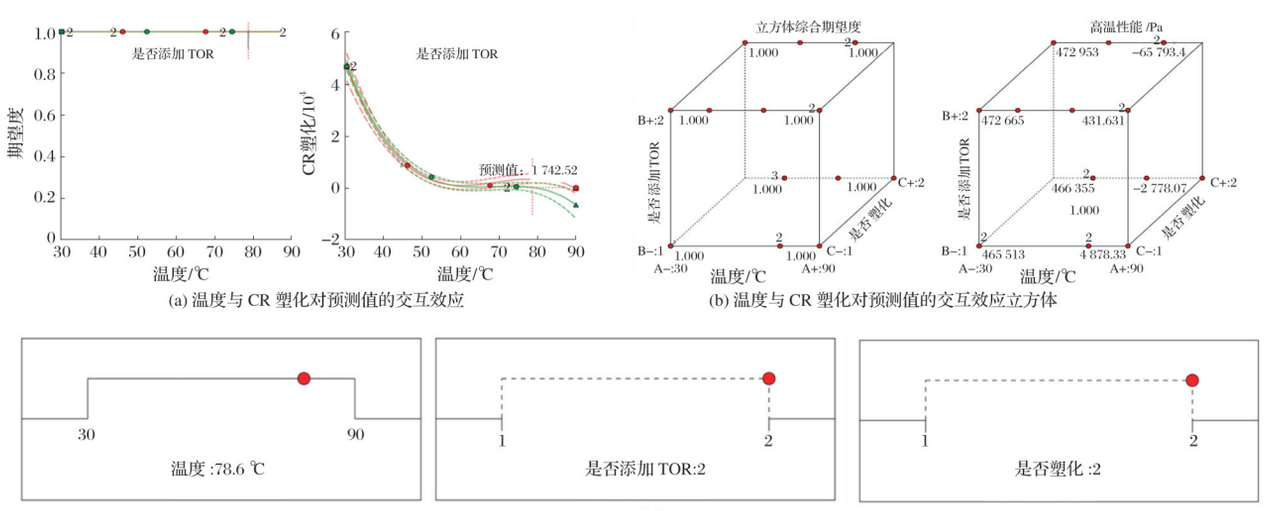
图4 0.1 kPa与3.2 kPa下改性沥青的MSCR曲线

Fig.4 MSCR curves of modified asphalt at 0.1 kPa and 3.2 kPa

2.4 改性沥青的体系优选

为了筛选高温服役环境下路用最佳的沥青体系，以宽温域的温度扫描结果为响应因素，采用Optimal设计进行分析[27]。试验温度范围为30~60 ℃，1代表胶粉塑化及添加TOR连接剂，2代表胶粉及不添加TOR连接剂。图5为沥青体系多因素优化与Optimal最佳求解。

从图5可以看出，不添加TOR的CR沥青在高温服役环境下具有更加优异的高温性能。CR沥青在宽温域内表现出更优异的高温性能，表明CR对沥青高温性能的改善效果更为显著。综合性能及经济表现，最终认为CR沥青更适用于高温服役环境。



(a) 温度与CR塑化对预测值的交互效应

(b) 温度与CR塑化对预测值的交互效应立方体

(c) 最优结果

图5 沥青体系多因素优化与Optimal最佳求解

Fig.5 Multi-factor optimization and optimal solution of asphalt system

3 结论

TOR通过其特征官能团(Si—O—Si)在CR与沥青之间形成桥接结构，提升两者的相容性。其中，PCR沥青的G^*和$G^*/\sin\delta$与CR沥青相比发生劣化。但当PCR与TOR进行复掺制备改性沥青后，TOR自身刚度提升整个沥青体系的高温性能。TOR会在一定程度上能够缓解塑化对CR的劣化效应，但其自身刚度对塑化CR体系的高温性能产生非预期的影响。MSCR结果证明了改性沥青的蠕变行为与应力水平的强相关性。在高应力(3.2 kPa)条件下，CR/TOR沥青表现出最低的累积应变和最优的抗蠕变能力，表明其在重载交通条件下具有更好的抗车辙潜力。值得注意的是，TOR对胶粉体系的增强效果显著，而对PCR

体系的改善作用有限，甚至在高应力下表现不佳。综合考虑高温性能、改性效果及经济性，未添加TOR的CR沥青在宽温域中表现出更稳定、更优异的高温流变性能，适用于长期高温服役环境。建议在实际工程中优先选用CR改性沥青，并视具体环境条件决定是否添加TOR。

参考文献

[1] 贾晓东, 葛垚, 王大为. 固废微粉改性沥青的微观结构及作用机理分析[J]. 材料导报, 2026, 40(3): 108-116.
[2] 吕惠, 曾晟, 彭祝涛, 等. 机器视觉在沥青路面病害检测中的应用[J]. 智能城市, 2024, 10(5): 19-21.
[3] 吴堃, 何万平, 熊立威, 等. 玄武岩纤维沥青混合料路用性能试验和离散元模拟研究[J]. 实验技术与管理, 2026, 43(7): 21-30.
[4] 丁逸锋. 就地热再生温度场模拟及热传导优化控制研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2025.
[5] 宁耕, 丁新沛. 废旧轮胎热解回收过程中环境监测的技术要点[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(3): 43-45.
[6] 林卓立. 高胶粉掺量复合改性沥青超薄磨耗层试验研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2025.
[7] 韦万峰, 张洪刚, 张仰鹏, 等. 废胶粉改性沥青改性机理、制备及性能研究进展[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(6): 1834-1853.
[8] 范杰强, 单伶燕, 梁晓东, 等. 膨化活性废胎胶粉温拌改性沥青及混合料性能研究[J]. 公路交通科技, 2024, 41(增刊2): 59-69.
[9] 杨林正, 杨洋, 晏永, 等. 废旧胶粉低温脱硫工艺及其改性沥青性能的研究[J]. 材料导报, 2025, 39(增刊2): 478-483.
[10] 穆建青. TOR连接剂及胶粉含量对橡胶沥青性能的影响[J]. 山西交通科技, 2018(6): 47-50.
[11] 王菊山, 范永强, 王学娟, 等. 多种活化方式下脱硫胶粉改性沥青流变特性及其微观机制[J]. 公路交通科技, 2025, 42(8): 43-52.
[12] 刘玉梅, 孙敏, 曹宁, 等. 废旧胶粉/碳纳米管复合改性沥青路用性能研究[J]. 应用化工, 2025, 54(7): 1914-1919.
[13] 王永宁, 李晓民, 杨涛, 等. 活化胶粉复合改性沥青混合料的路用性能评价[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2): 114-120.
[14] 孙强, 李广兵, 隋国栋, 等. 脱硫胶粉复合改性高模量沥青制备及其混合料性能分析[J]. 森林工程, 2025, 41(5): 1062-1072.
[15] 胡磊. 植物油基老化沥青再生剂效果的分子机制[D]. 福州: 福建农林大学, 2025.
[16] 宁志康. 活化胶粉/PPA复合改性沥青制备及其性能研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024.
[17] 陈舒琪. 新-旧沥青胶浆混融行为分析及融合程度的多尺度表征[D]. 金华: 浙江师范大学, 2024.
[18] 刘邦宇. SBR改性乳化沥青冷铺混合料性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
[19] 宫明阳. 混凝土弯坡桥铺面结构损伤行为多尺度研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
[20] 周瑾, 周梓豪, 刘沅, 等. 不同加载方式下的水泥稳定碎石材料动态模量分析[J]. 湖南交通科技, 2025, 51(1): 102-105.
[21] 胡聪. 沥青砂浆动态黏弹性行为与预估模型研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
[22] 李林涛, 刘锋, 胡鑫, 等. 高黏复合改性沥青老化性能及机理分析[J]. 合成材料老化与应用, 2026, 55(1): 32-37.
[23] 马翔, 林卓立, 吴宣, 等. 复合改性硬质沥青的高温特性[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2025, 46(6): 739-744.
[24] 孙吉书, 贺煜峰, 张民, 等. 废油复合再生沥青流变性能和微观特性研究[J]. 功能材料, 2025, 56(3): 3113-3120.
[25] 郭风春, 毕海鹏, 王海涛, 等. 基于时温等效的纳米碳粉改性沥青黏弹行为[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(1): 221-229.
[26] 奚晨晨, 严守靖, 魏金涛, 等. MSCR试验对不同老化程度高黏沥青高温性能分析[J]. 中国测试, 2024, 50(4): 153-159.
[27] 黄晓秋. 基于响应曲面的复合阻燃沥青制备及性能研究[J]. 西部交通科技, 2025(10): 69-72.