

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.010

引用格式:路颖铎.DOP 橡胶改性沥青的相容性与耐久性研究[J].公路与汽运,2025,41(2):45-50.

Citation:LU Yingduo.Study on compatibility and durability of modified asphalt with dioctyl phthalate and rubber powder[J].  
Highways & Automotive Applications,2025,41(2):45-50.

# DOP 橡胶改性沥青的相容性与耐久性研究

路颖铎

(河北交通运输综合执法监督局,河北 石家庄 050000)

**摘要:**为提升废橡胶粉在沥青中的分散程度与耐久性,采用内掺法预混 80%橡胶粉与 20%邻苯二甲酸二辛酯(DOP),按沥青质量的 20%将其加入基质沥青中,制成 DOP 橡胶改性沥青;以橡胶粉掺量 16%的普通橡胶改性沥青为对照,通过荧光显微镜观察橡胶粉在 DOP 橡胶改性沥青和普通橡胶改性沥青中的分散情况,通过动态剪切流变试验分析 2 种改性沥青的流变性能,通过弯曲流变试验评估 2 种改性沥青的耐久性。结果表明,与普通橡胶改性沥青相比,DOP 橡胶改性沥青拥有更好的橡胶颗粒分散均匀性、抗剪切变形能力、抗老化和低温抗变形能力,DOP 能显著增强橡胶改性沥青的耐久性和橡胶粉在沥青中的分散均匀性。

**关键词:**道路;橡胶改性沥青;邻苯二甲酸二辛酯(DOP);相容性;耐久性;分散均匀性

中图分类号:U416.217

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0045-06

橡胶改性沥青是一种将废橡胶粉作为改性剂融入沥青的复合材料,既能实现废橡胶的资源化利用,又能显著提升沥青性能<sup>[1-2]</sup>。制备过程中,利用专业设备在高温高速条件下对废橡胶粉与沥青进行剪切或搅拌,确保橡胶粉均匀融入沥青,增强其黏附力、弹性恢复能力、抗疲劳强度和耐候性能<sup>[3-4]</sup>。橡胶粉的弹性和韧性特质使橡胶改性沥青在路面铺设中表现出优良的抗裂与耐久性能,能延长道路使用寿命<sup>[5-7]</sup>。但橡胶颗粒在沥青中的溶胀效果如果不理想,将带来多方面不良后果。溶胀是橡胶颗粒与沥青结合的关键,有助于颗粒均匀分散。溶胀效果不佳会导致橡胶颗粒团聚,影响沥青的均匀性和稳定性<sup>[8-11]</sup>,橡胶颗粒与沥青的结合力减弱,降低沥青的弹性恢复、抗疲劳和耐候性能<sup>[12-14]</sup>。此外,溶胀不良的橡胶颗粒无法有效吸收和分散路面应力,会降低路面耐久性,增加施工难度,影响质量控制稳定性<sup>[15-16]</sup>。为优化橡胶颗粒在沥青中的溶胀效果,可优化橡胶粉的粒径和掺量,确保其与沥青充分结合<sup>[17-19]</sup>;提高搅拌温度和剪切时间,促进橡胶颗粒溶胀和分散<sup>[20-22]</sup>;添加助剂如增容剂、分散剂等,降低橡胶颗粒与沥青的界面张力,促进溶胀和分散<sup>[23-24]</sup>。本文采用邻苯二甲酸二辛酯(DOP)作为改善橡胶颗粒与沥青相容性的助剂制备 DOP 橡胶改性沥青,以橡胶粉掺量 16%的普通橡胶改性沥青

为对照,通过荧光显微镜观测橡胶颗粒在沥青中的分散情况,通过动态剪切流变试验分析橡胶改性沥青的流变性能,通过弯曲流变试验评估沥青老化后的耐久性,研究 DOP 橡胶改性沥青的相容性和耐久性。

## 1 材料与试验

### 1.1 DOP 橡胶改性沥青和普通橡胶改性沥青的制备

采用京博 70# A 级道路石油沥青,其各项性能指标(见表 1)均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》<sup>[25]</sup>的要求。

表 1 京博 70# A 级道路石油沥青的性能指标

检测项目	规范要求	检测结果
针入度(25 °C,100 g,5 s)/(0.1 mm)	60~80	71
软化点(环球法)/°C	≥46	46.5
延度(15 °C,5 cm/min)/cm	≥100	>100
含蜡量(蒸馏法)/%	≤2.2	0.8
闪点(COC)/°C	≥260	320
溶解度(三氯乙烯)/%	≥99.5	99.9
密度(15 °C)(g·cm <sup>-3</sup> )	实测记录	1.037
RTFOT 后	质量损失/%	±0.8
残留物	针入度比/%	≥61
	延度(15 °C)/cm	≥15

DOP 来自无锡市亚泰联合化工有限公司,其物理参数见表 2。DOP 分子兼具极性基团和非极性基团,邻苯二甲酸部分(由 2 个羧基—COOH 连接于苯环构成)具有亲水性,能与水分子或其他极性分子形成氢键;2 个 2-乙基己基部分( $-C_8H_{17}$ , 含 1 个乙基与 2 个甲基)具有疏水性,易与油脂、烃类等非极性物质相混溶。DOP 的非极性基团能与聚氯乙烯(PVC)等塑料的分子链发生作用,有效降低分子链间的相互作用力,进而提升塑料的弹性和韧性。因此,DOP 常被用作 PVC 等塑料制品的增塑剂。

表 2 DOP 的物理参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
分子式	$C_{24}H_{38}O_4$	相对密度	0.972~0.978
分子量	390.57	折光率	1.482~1.485
形状	无色液体	沸点/ $^{\circ}C$	384.9
质量浓度/%	$\geq 98$		

橡胶粉由废旧橡胶轮胎加工而成,其物理参数见表 3。橡胶中不仅包含碳—碳键(C—C)、碳—氢键(C—H)等非极性键,还存在碳—硫键(C—S)、硫—硫键(S—S)等极性键。

表 3 橡胶粉的物理参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
粒度/目	60	铁的质量分数/%	$< 0.03$
相对密度	1.1	相对密度	0.972~0.978
含水量/%	$< 1$	纤维的质量分数/%	$< 1$
沸点/ $^{\circ}C$	384.9		

掺量、温度、时间等因素对橡胶改性沥青性能均有重要影响,考虑到本文研究核心是探究 DOP 对橡胶改性沥青分散性和耐久性等性能的提升效果,改性剂掺量、制备温度、剪切时间等因素参考相关文献和工程实践经验值。

如图 1 所示,采用内掺法,将 20% DOP 和 80% 橡胶粉进行混合搅拌,加热时间为 10 min,加热温度为 200  $^{\circ}C$ ;将沥青加热至 150  $^{\circ}C$  左右,将 20% DOP 橡胶粉和 16% 普通橡胶粉分别加入基质沥青中,并将温度升高至 180  $^{\circ}C$ ,以 4 500 r/min 的速率剪切 40 min;将混合物在 150  $^{\circ}C$  烘箱中保温 10 min,得到 DOP 橡胶改性沥青和普通橡胶改性沥青。

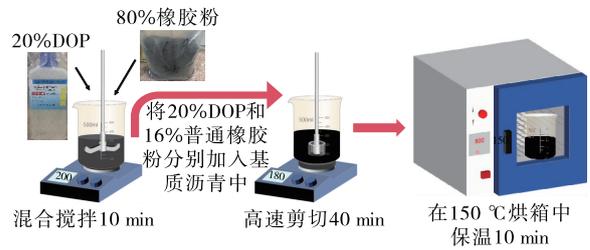


图 1 DOP 橡胶改性沥青和普通橡胶改性沥青的制备

## 1.2 试验

橡胶粉在沥青中的分散均匀性采用荧光显微镜观测,流变性能和车辙因子采用动态剪切流变仪测试,老化试验采用压力老化容器,劲度模量采用弯曲流变仪测试。压力老化、动态剪切流变试验和弯曲流变试验按 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》<sup>[26]</sup> 执行,其中车辙因子在 60  $^{\circ}C$  下测试,劲度模量在 -10  $^{\circ}C$  下测试。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 基于荧光显微镜的分散均匀性分析

荧光强度与被检测物质中荧光标记物的质量分数或数量直接相关,通常成正比关系。分散质在介质中均匀分散时,荧光标记物也均匀分布,从而表现出均匀的荧光强度;若分散质在介质中分布不均,如出现团聚或沉降等现象,荧光标记物的分布会受到影响,导致荧光强度呈现不均匀分布。DOP 橡胶改性沥青和普通橡胶改性沥青的微观结构见图 2。

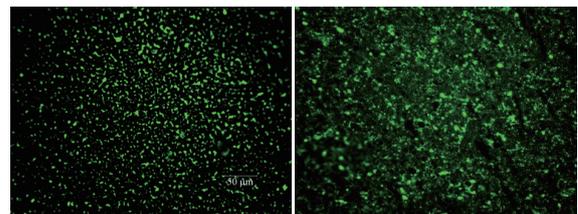


图 2 DOP 和普通橡胶改性沥青的微观结构

由图 2 可知:普通橡胶改性沥青的微观结构中,荧光强度呈斑点状分布,说明橡胶粉在其内部分布不均,轻质组分沥青未能充分促使橡胶分子溶胀,导致橡胶分子链仍处于相互缠绕和蜷缩状态。DOP 橡胶改性沥青的微观结构则表现出均匀的荧光强度分布,橡胶粉在 DOP 橡胶改性沥青中具有更出色的分散性能。这一显著改善可归因于 DOP 分子的独特作用,DOP 分子能插入橡胶分子链的间隙中,并通过其极性酯基与橡胶的极性基团发生作用实现

互溶,有效削弱橡胶分子链之间的相互作用力,增强橡胶分子链的流动性。此外,DOP 的非极性烷基部分位于橡胶分子链之间,起到遮蔽橡胶极性基团的作用,能进一步降低橡胶分子链之间的相互作用力,降低橡胶的结晶度,从而使橡胶分子更易于分散在沥青分子中。

## 2.2 橡胶粉分散均匀性对橡胶改性沥青流变性能的影响

沥青材料的流变性能体现在宾汉屈服应力和触变性上,与沥青的路用性能紧密相关,对沥青路面的使用效果和寿命产生深远影响。宾汉屈服应力是指非牛顿流体在剪切力作用下开始流动所需最小应力,其大小直接反映材料抵抗剪切变形的能力。高宾汉屈服应力的沥青具有更强的抗剪切变形能力,能有效保持沥青路面在车辆荷载作用下的结构稳定性,减少路面变形和损坏;宾汉屈服应力较低的沥青在剪切力作用下易发生流动,可能导致路面出现车辙、推移等病害,降低路面的使用性能和寿命。触变性是指经受外力作用后材料黏度及流动性随时间发生的变化。若沥青具有触变特性,压路机在压实沥青路面时会对其施加剪切力,产生一定的剪切速率,进而引发沥青黏度的相应变化。分析橡胶粉分散均匀性对橡胶改性沥青流变性的影响对于提升沥青路面的整体性能和使用寿命具有重要意义。采用动态剪切流变试验分析橡胶改性沥青的流变性能。

### 2.2.1 流动特性分析

不同剪切速率和温度下 2 种橡胶改性沥青的流变特性如图 3 所示。由图 3 可知:1) 60 °C 条件下,普通橡胶改性沥青的黏度不受剪切速率的影响,表现出牛顿流体特性。60 °C、110 °C 和 160 °C 条件下,DOP 橡胶改性沥青在低剪切速率时出现剪切增稠现象,随着剪切速率的逐渐提升,黏度在达到峰值后逐步下降,出现剪切变稀现象。2) 在 0.01 s<sup>-1</sup> 的速率连续剪切作用下,DOP 橡胶改性沥青的黏度随时间不断提高,说明低剪切速率下 DOP 橡胶改性沥青具有剪切增稠的流变特性;以 10 s<sup>-1</sup> 的速率连续剪切时,DOP 橡胶改性沥青的黏度迅速降低至某一稳定值,不再发生变化,说明高剪切速率下 DOP 橡胶改性沥青具有剪切稀化的流变特性。DOP 橡胶改性沥青的这种复杂流变行为与其独特的分子结构紧密相关。低剪切速率下,DOP 包裹下的聚合物链与沥青分子通过物理吸附、机械咬合和化学键等多种作用相互交织形成稳定的网状或蜂窝状结构,

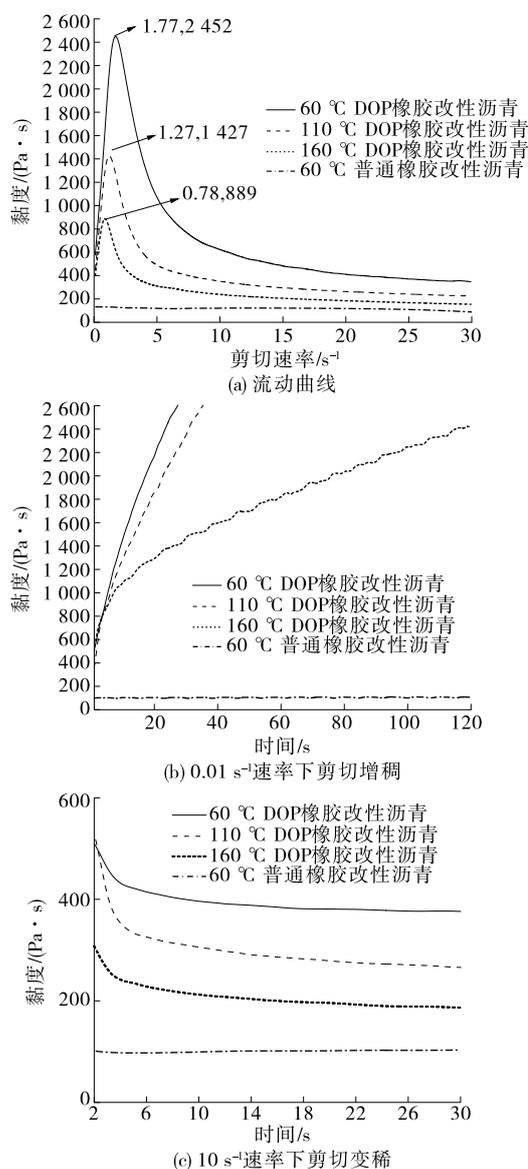


图 3 不同剪切速率和温度下 2 种橡胶改性沥青的流变特性

导致剪切增稠;而较高剪切速率下这种网状结构逐渐被破坏,使 DOP 橡胶改性沥青出现剪切变稀的现象;剪切速率超过 15 s<sup>-1</sup> 时,不同温度下 DOP 橡胶改性沥青的黏度进入一个平台区域,几乎不再随剪切速率增加而降低,这主要是因为其网状结构几乎被破坏。3) 普通橡胶改性沥青中的橡胶颗粒与沥青的相容性较差,其分子链未能充分融入沥青分子中,橡胶颗粒主要起填充作用。因此,普通橡胶改性沥青并未出现剪切增稠和剪切变稀的现象。

### 2.2.2 屈服应力分析

不同温度下 2 种橡胶改性沥青的黏度随剪切应力的变化见图 4。由图 4 可知:2 种橡胶改性沥青的

黏度均随剪切应力的变化而变化,与黏度峰值相对应的应力即为橡胶改性沥青的屈服应力。普通橡胶改性沥青即便在 60 °C 条件下也未表现出屈服应力,而 DOP 橡胶改性沥青在温度高达 160 °C 时依然保持着屈服应力。

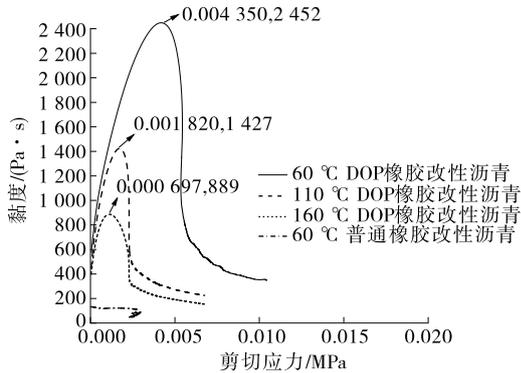


图 4 不同温度下 2 种橡胶改性沥青的黏度随剪切应力的变化

图 5 为 DOP 橡胶改性沥青的网状结构。由图 5 可知:在较低剪切速率下,DOP 橡胶改性沥青的网状结构得以保持,DOP 橡胶改性沥青发生弹性变形;剪切速率逐渐增大时,其网状结构逐渐被瓦解,黏度急剧下降。

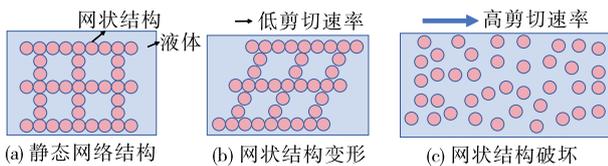


图 5 DOP 橡胶改性沥青的网状结构

夏季路表温度可高达 60 °C,普通沥青路面在行车荷载作用下极易形成车辙;而 DOP 橡胶改性沥青在 60 °C 时具有较高的屈服应力,采用 DOP 橡胶改性沥青的路面具有较好的抗车辙性能。

2.2.3 沥青触变性

如图 6 所示,经历低速剪切、高速剪切再返回低速剪切后,非触变性材料的黏度迅速恢复,而触变性材料的黏度逐渐恢复。这种触变性的根源在于物质的分子网状结构在外部剪切力作用下遭到破坏,而外力移除后,其微观网络结构的恢复需要一定的时间。

图 7~10 为不同剪切速率和温度下 2 种橡胶改性沥青的触变性。由图 7~10 可知:1) DOP 橡胶改性沥青在 60 °C、110 °C、160 °C 条件下均呈现触变性,其二次剪切黏度曲线的斜率相较于一次剪切

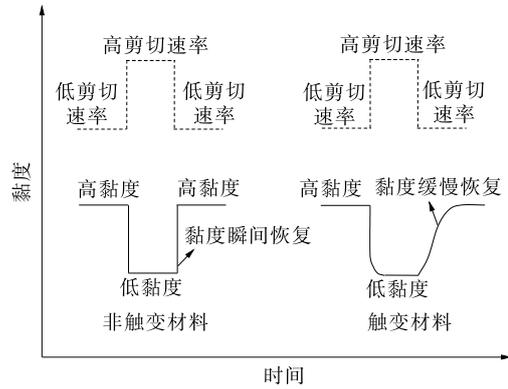


图 6 材料的触变性示意图

时有所减小。这是由于 DOP 橡胶改性沥青中的网状结构在剪切过程中遭到破坏,而网状结构的重建存在滞后性,DOP 橡胶改性沥青在二次剪切后的黏度无法立即恢复。2) 60 °C 时 DOP 橡胶改性沥青的黏度恢复迅速,160 °C 时黏度恢复相对平缓,这种黏度随温度变化的特性对 DOP 橡胶改性沥青施工和使用极为有利。橡胶改性沥青路面的常规施工温度约为 180 °C,该温度时 DOP 橡胶改性沥青在触变性影响下其剪切增稠效应显著减弱,能促进路面的碾压成型,从而确保施工效率和质量。3) 普通橡胶改性沥青的黏度在不同剪切速率下均稳定在 100 Pa·s 左右,表明普通橡胶改性沥青不具备触变性。

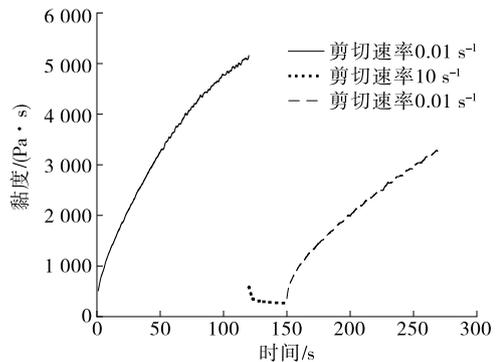


图 7 60 °C 时不同剪切速率下 DOP 橡胶改性沥青的触变性

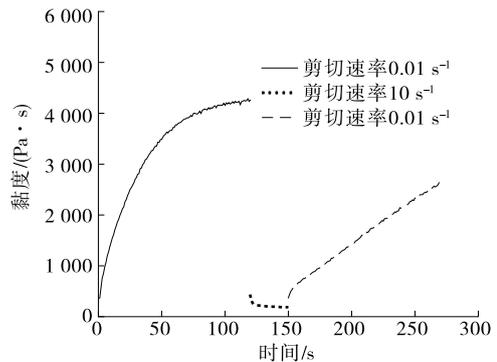


图 8 110 °C 时不同剪切速率下 DOP 橡胶改性沥青的触变性

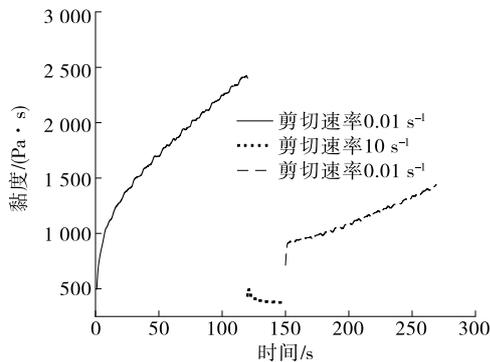


图 9 160 °C 时不同剪切速率下 DOP 橡胶改性沥青的触变性

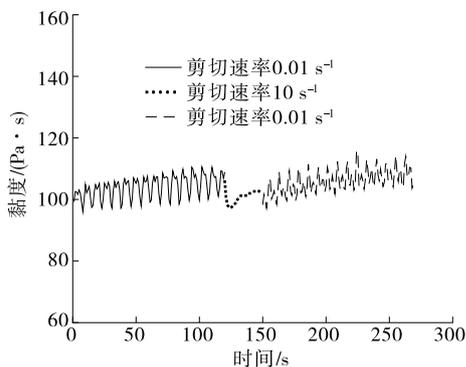


图 10 60 °C 时不同剪切速率下普通橡胶改性沥青的触变性

### 2.3 橡胶改性沥青的耐久性分析

车辙因子是衡量沥青高温性能的关键指标,表征沥青在高温环境下抵抗变形的能力。沥青老化后,车辙因子一般急剧增大,若车辙因子过高,会削弱沥青的低温抗裂性能,导致路面在低温环境下易开裂。因此,在确保沥青高温稳定性的同时,须兼顾其低温抗裂性能。

弯曲流变试验是评估沥青低温抗裂性能的重要手段,蠕变曲线的斜率  $m$  反映沥青在低温下的应力松弛能力,其值越大,低温应力累积越难,可降低沥青路面低温下开裂风险。老化前后 2 种橡胶改性沥青的耐久性试验结果见图 11。沥青老化采用压力老化容器。

由图 11 可知:1) 60 °C 条件下,DOP 橡胶改性沥青的车辙因子为 1.74 kPa,与普通橡胶改性沥青相比提高 38.1%,DOP 橡胶改性沥青拥有更好的高温抗变形能力。老化后,DOP 橡胶改性沥青的车辙因子为 8.03 kPa,与普通橡胶改性沥青相比降低 38.5%,DOP 橡胶改性沥青具有更卓越的抗老化性能。这与橡胶和沥青中极性基团的特性密切相关,极性基团具有强吸电子能力,能增强附近氢原子的活性。橡胶改性沥青热氧老化时,氧气优先攻击这

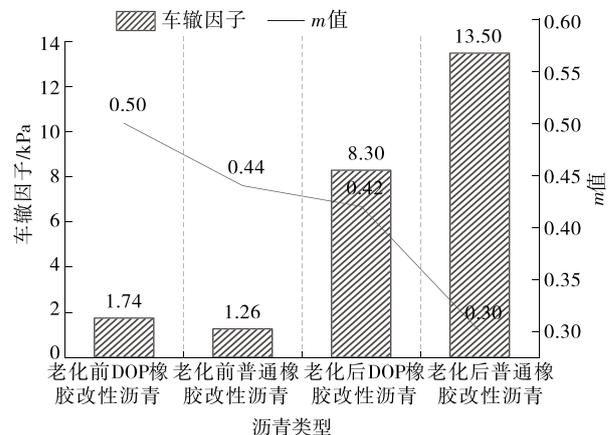


图 11 老化前后 2 种橡胶改性沥青的耐久性试验结果

些活跃氢原子,不仅造成羰基、羧基等极性基团的产生,还会加剧分子间聚合,从而形成大分子。而 DOP 橡胶改性沥青具有独特的分子结构,能抵抗这一老化趋势。DOP 分子中既包含极性基团,也包含非极性基团,其极性基团与橡胶、沥青极性基团相互作用,非极性基团在外形成保护层,从而阻挡自由基的进攻。2) 老化前,DOP 橡胶改性沥青的  $m$  值为 0.50,与普通橡胶改性沥青相比增加 13.6%;老化后,DOP 橡胶改性沥青的  $m$  值为 0.42,与普通橡胶改性沥青相比增加 40.0%。表明 DOP 橡胶改性沥青在低温环境下具有卓越的变形能力。橡胶作为高分子聚合物,其分子结构由众多重复单元经化学键连接成长链,分子量跨度极大,从数万至数十万,分子链内原子与基团的持续运动导致橡胶分子无法维持直线形态,而是相互缠绕,形成卷曲或蜷缩结构。普通沥青中的轻组分主要为烷烃,缺乏极性基团,难以促使橡胶分子解缠,橡胶颗粒在沥青中大多以填充物形式存在,无法有效展现其熵弹性。而 DOP 分子中极性酯基能与橡胶分子中极性基团发生相互作用,如形成氢键或产生库仑力等,促使 DOP 分子紧密包裹橡胶分子,形成保护层。该保护层能减弱橡胶分子链间的相互作用,降低其蜷缩与缠绕程度,使部分分子链以自由状态与沥青分子充分融合,均匀散布于沥青中。同时适度的蜷缩状态保留了橡胶分子的熵弹性,进一步增强了沥青的变形能力。因此,与普通橡胶改性沥青相比,DOP 橡胶改性沥青具有更优的抗老化性能和低温抗变形能力。

### 3 结论

(1) 与普通橡胶改性沥青相比,DOP 橡胶改性沥青具有更出色的分散性能,这一特性赋予橡胶改

性沥青宾汉屈服应力和触变性。

(2) 相较于普通橡胶改性沥青, DOP 橡胶改性沥青在抗老化性能方面优势明显。

(3) 在低温环境下, DOP 橡胶改性沥青的抗裂性能比普通橡胶改性沥青更优异。

(4) DOP 分子凭借其独特的极性与非极性基团结构, 能有效降低橡胶分子间的相互作用强度, 促进橡胶成分在沥青基质中均匀、稳定地分散, 从而显著优化橡胶改性沥青的流变特性, 大幅度提升其耐久性能。

#### 参考文献:

- [1] 吴水辉, 张登科, 王辉. 废胶粉复合改性沥青制备与性能研究[J]. 公路与汽运, 2023(1): 55-59.
- [2] 姚文霞. 废胶粉与废塑料复合改性沥青混合料性能研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 8-13.
- [3] 宋宽彬, 王笑风, 褚付克, 等. 基于正交试验的胶粉改性沥青配方优化[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(4): 14-19.
- [4] 熊梦日, 王辉. 预处理废胶粉复合改性沥青制备工艺探讨[J]. 公路与汽运, 2022(1): 51-53+86.
- [5] 徐光霁, 范剑伟, 马涛, 等. 高掺量废胎胶粉改性沥青性能研究[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 1-8.
- [6] 李文博, 柳力, 刘朝晖, 等. 促溶-表面处理二元复合作用对橡胶沥青性能的影响[J]. 材料导报, 2022, 36(11): 122-128.
- [7] 谢娟, 陈学儒, 罗浩宸, 等. 不同活化方式对橡胶沥青-集料黏附性的影响[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 322-330.
- [8] 柳力, 朱晓明, 刘朝晖, 等. 钢渣掺量对橡胶沥青混合料 ARAC-13 性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(10): 62-68.
- [9] 郇海洋, 郭荣鑫, 晏永, 等. 硫磺改性沥青研究进展[J]. 材料导报, 2023, 37(增刊 2): 169-174.
- [10] 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.
- [11] 张炯. 橡胶沥青热储存性能研究[J]. 公路与汽运, 2022(3): 48-50.
- [12] 姚震, 张凌波, 梁鹏飞, 等. 多种湿法橡胶改性沥青的综合性能评价与改性机理研究[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 97-103.
- [13] 温永, 王祯国, 董永康, 等. Terminal Blend 橡胶泡沫沥青制备及性能评价[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(10): 1129-1136.
- [14] 周超. 橡胶粉改性生物沥青的老化特性研究[J]. 中外公路, 2022, 42(4): 237-243.
- [15] 房辰泽, 郭乃胜, 尤占平, 等. 基于能量耗散历史的沥青混合料疲劳损伤特性研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(6): 1018-1024.
- [16] 李小重, 王笑风, 冯明林, 等. 橡胶颗粒对沥青的改性机理及其混溶体系分析[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 249-253.
- [17] 金大勇, 颜川奇, 易宏宇, 等. 老化对改性沥青宽温度域黏弹特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(12): 1321-1328.
- [18] 马涛, 陈葱琳, 张阳, 等. 胶粉应用于沥青改性技术的发展综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 1-16.
- [19] 季学文, 许志扬, 石鹏程, 等. 橡胶粉和 SBS 复合改性沥青抗车辙因子非线性模型[J]. 中外公路, 2022, 42(5): 184-188.
- [20] 彭博, 凌天清, 葛豪. 纳米粒子改性橡胶沥青抗老化性能研究[J]. 材料导报, 2022, 36(20): 265-272.
- [21] 于华洋, 张正, 邓溢豪, 等. 基于分层剥离试验的温拌橡胶沥青改性机理研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2024, 52(8): 126-137.
- [22] 李佳庆. 蜡基温拌剂对废橡胶粉改性沥青车辙与疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 230-235.
- [23] 吕磊, 赵辰, 李蕊, 等. 烯烃复分解催化胶粉改性沥青制备工艺与性能评价[J]. 中国公路学报, 2023, 36(12): 143-154.
- [24] 于晓晓, 王珊珊, 俞炜, 等. 橡胶沥青施工黏度的多尺度特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(3): 1-11.
- [25] 交通部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F 40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [26] 交通运输部公路科学研究院. 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.

收稿日期: 2024-09-16