

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022011723101998

文章编号:1674-599X(2023)05-0091-11

引用格式:谢文,秦仁杰,彭翔,等.生物沥青-聚氨酯复合改性沥青性能研究[J].交通科学与工程,2023,39(5):91-101,110.

Citation: XIE Wen, QIN Renjie, PENG Xiang, et al. Study on the performance of bio-asphalt polyurethane compound modified asphalt[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 91-101, 110.

生物沥青-聚氨酯复合改性沥青性能研究

谢文^{1,2}, 秦仁杰¹, 彭翔³, 李邦武⁴

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410014;

2. 天津市交通科学研究院, 天津 300000;

3. 广东省交通规划设计研究院, 广东 广州 510000;

4. 海南省交通工程建设局, 海南 海口 570100)

摘 要:为探究生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的性能,制备28种不同掺量的生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件,采用沥青针入度、软化点、延度、高低温流变试验及微观试验对试件进行综合分析与评价。研究表明:15%的生物沥青与6%的聚氨酯为生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的最佳配比掺量;与对照组相比,所制备的生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的高温抗车辙性能得到了大幅提高,且其低温性能的提升也十分显著;生物沥青-聚氨酯复合改性沥青内部发生了化学改性,且其整体混合均匀,形成了网状填充的稳定结构。该研究可为类似改性沥青材料的研究提供参考。

关键词:复合改性沥青;生物沥青;聚氨酯;流变性能;微观形貌

中图分类号:U414

文献标志码:A

Study on the performance of bio-asphalt polyurethane compound modified asphalt

XIE Wen^{1,2}, QIN Renjie¹, PENG Xiang³, LI Bangwu⁴

(1. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410014, China;

2. Tianjin Transportation Science Research Institute, Tianjin 300000, China;

3. Guangdong Provincial Transportation Planning and Design Institute, Guangzhou 510000, China;

4. Hainan Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Haikou 570100, China)

Abstract: In order to explore the performance of bio asphalt / polyurethane composite modified asphalt, 28 kinds of bio asphalt / polyurethane composite modified asphalt with different content were prepared. The performance was comprehensively analyzed and evaluated by three index tests of asphalt, high and low temperature rheological tests and micro tests. The results show that the 15% bio asphalt and the 6% polyurethane is the best proportion; Compared with the control group, the high-temperature rutting resistance of the prepared bio asphalt / polyurethane composite modified asphalt is improved significantly, and the low-temperature performance is also improved. Chemical modification occurs inside the bio-asphalt-polyurethane composite modified asphalt. Which mixes evenly, forming a stable network filling structure. This study can provide reference for the research of similar modified asphalt materials.

Key words: composite modified asphalt; bio asphalt; polyurethane; rheological properties; micro morphology

近些年来,中国的道路建设取得了长足的发展,不仅在总量和密度上有所增长,还在高速公路、

桥梁隧道、路网结构优化和农村公路通达深度等方面取得了显著进展。这些成就对于提高中国交通

收稿日期:2021-01-17

基金项目:海南省交通科技项目(J-ZX-ZAK-02-2021);长沙理工大学研究生科研创新项目(CX2021SS15)

作者简介:谢文(1998—),男,长沙理工大学硕士生。Email:724768826@qq.com

基础设施水平和促进社会经济发展具有重要意义。但这些道路基本上都是石油沥青路面,这些路面的后续维护将不可避免地需要消耗大量石油沥青。石油沥青是石油的副加工产品。作为一种不可再生且在地球上储量有限的能源,石油可能在未来某个时间点耗尽。因此,亟须找到石油沥青的替代品,以减少交通道路工程对石油资源的依赖^[1]。生物沥青是一种可由工、农、林业等产业资源制备而来的新型环保材料^[2]。与石油沥青相比,生物沥青具有来源广泛、经济适用、低温性能良好等优点^[3-4],且其与石油沥青相容性良好^[5]。然而,生物沥青高温性能略差^[6-7],这个缺点会降低由其铺设路面的高温抗车辙性能^[8]。因此,有必要通过使用添加剂对生物沥青进行改性,从而提升其高温抗车辙性能等高温性能^[9]。聚氨酯是一种介于橡胶和塑料之间的两相聚合物弹性体^[10-11],具有强度高、弹性好、抗拉强度高、耐磨、耐高温等优点^[12-14],且聚氨酯与沥青的亲合性良好^[15-16],能与沥青发生化学反应,形成致密的网络结构^[17-18]。因此,聚氨酯被越来越多的研究选为各种沥青的改性剂^[19-20],以增强沥青的强度和高温性能^[21-23]。生物沥青和聚氨酯的结合不仅能缓解石油资源逐渐枯竭的趋势,还可降低道路建设和路面维护成本^[24],具有广阔的应用前景^[25-26]。

本研究拟将生物沥青与聚氨酯复合,制备28种不同掺量的复合改性沥青试件,并开展沥青针入度、软化点、延度、高低温流变试验及微观试验,对不同掺量的生物沥青-聚氨酯的复合改性沥青的低温性能、高温性能及微观形貌进行分析,寻找聚氨酯与生物沥青的最佳掺量,为生物沥青的利用与研究提供理论支持与借鉴。

1 试验材料

1.1 原材料性能指标

本研究试验所选用的各项原材料有:

1) 石油沥青:本试验石油沥青采用中国石化扬子石油化工有限公司生产的70#A级沥青,其性能指标见表1。在表1中,薄膜烤箱试验(thin film oven test, TFOT)是一种沥青老化试验方法。在TFOT试验中,先将一定量的沥青试件放入烤箱中,在163℃的高温下加热5 h,再进行各项性能测试;

2) 生物沥青:本试验所采用的生物沥青为蓖麻油生物沥青,蓖麻油生物沥青来自生产蓖麻油过程中产生的废弃物,这些废弃物经过加工,提取出来的膏状物即为蓖麻油生物沥青。与传统的石油沥青相比,蓖麻油生物沥青对环境的影响更小一些,且其具有较强的黏结性与抗老化性能。本试验所用的蓖麻油生物沥青的具体性能指标见表2;

3) 聚氨酯:本试验聚氨酯采用硬度较大的C2090型号,其基本指标见表3;

4) 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物(styrene butadiene styene triblock copolymer, SBS):本试验SBS采用巴陵石化公司生产的3501线型SBS,其性能指标见表4。

表1 石油沥青性能指标检测

Table 1 Petroleum asphalt performance index detection

项目	指标要求	试验结果
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/ (0.1 mm)	(60, 80)	70.9
针入度指数	[-1.5, 1.0]	-1.3
软化点/℃	[46, +∞)	46.7
60℃动力黏度/(Pa·s)	[180, +∞)	201
10℃延度/cm	[15, +∞)	92
15℃延度/cm	[100, +∞)	≥100
闪点/℃	[260, +∞)	297
溶解度/%	[99.5, +∞)	99.68
密度(15℃)/(g·cm ⁻³)	实测记录	1.024
TFOT 试验	质量变化/%	[-0.8, +0.8]
	残留针入度比/%	[61, +∞)
	残留延度(10℃)/cm	[6, +∞)

表2 蓖麻油生物沥青性能指标

Table 2 Performance indicators of castor oil bio-bitumen

项目	试验结果
沥青含量/%	86.57
熔点/℃	65
密度/(g·cm ⁻³)	0.98
常温状态下外观	黑色膏状物

表 3 聚氨酯 C2090 性能指标

Table 3 Polyurethane C2090 performance indicators

项目	性能指标
硬度, Shore A	90
抗张强度/ MPa	35
伸长率/ %	>500
撕裂强度/ (kN·m ⁻¹)	60
常温状态下外观	透明胶状

表 4 SBS 性能指标

Table 4 SBS performance indicators

项目	指标	检测结果
苯乙烯含量/ %	(28,32)	31
熔体每 10 min 流动质量/ g	[0.01,0.50]	0.21
挥发份/ %	(-∞,1]	0.25
灰分/ %	(-∞,0.2]	0.13
拉伸强度/ MPa	[18,+∞)	21.2
常温状态下外观	—	白色多孔条状物

1.2 试验配比设计

本次试验的对照组和试验组均含有掺量为 5% 的 SBS,但对照组除 5% SBS 外,未掺入其他物质,试验组不仅含有掺量为 5% 的 SBS,还含有其他掺量的聚氨酯和生物沥青。本研究仅对生物沥青和聚氨酯的掺量进行讨论,其中,生物沥青和聚氨酯均按沥青质量百分比取代石油沥青。为研究本试验中生物沥青掺量的最佳范围,先在不掺加聚氨酯的情况下,在掺有 5% SBS 的石油沥青中,将生物沥青掺量按照每次增加 10% 的比例,从 10% 递增至 100%,共进行了 10 组试验。试验结果表明:当生物沥青掺量较高时,试件在常温下会过于柔软;当生物沥青质量掺量降低至 30% 以下时,试件在室温状态下呈较为坚硬的状态。因此,本试验选取的生物沥青掺量均小于 30%。参考文献[27],较为适宜的聚氨酯掺量为 0%~10%,这也是本次试验最终确定的聚氨酯掺量范围。

经过试验与对文献[27]中的各物质掺量进行对比和分析,最终确定试验试件各物质掺量范围是:生物沥青掺量分别为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%,聚氨酯掺量分别为 0%、4%、6%、8%。试验方案设计见表 5。

表 5 试验方案设计

Table 5 Test protocol design

方案名称	方案类型
对照组	5%SBS 改性沥青
方案 1	5%SBS 改性沥青+4% 聚氨酯+5% 生物沥青
方案 2	5%SBS 改性沥青+4% 聚氨酯+10% 生物沥青
方案 3	5%SBS 改性沥青+4% 聚氨酯+15% 生物沥青
方案 4	5%SBS 改性沥青+4% 聚氨酯+20% 生物沥青
方案 5	5%SBS 改性沥青+4% 聚氨酯+25% 生物沥青
方案 6	5%SBS 改性沥青+6% 聚氨酯+5% 生物沥青
方案 7	5%SBS 改性沥青+6% 聚氨酯+10% 生物沥青
方案 8	5%SBS 改性沥青+6% 聚氨酯+15% 生物沥青
方案 9	5%SBS 改性沥青+6% 聚氨酯+20% 生物沥青
方案 10	5%SBS 改性沥青+6% 聚氨酯+25% 生物沥青

1.3 复合改性沥青的制备

采用高速剪切法进行复合改性沥青试件的制备。经过多次试验,发现生物沥青、SBS 和聚氨酯的最佳添加温度、剪切速率及添加时间都略有区别^[28]。因此,将材料的添加分为 3 个阶段进行:

1) 先将石油沥青按照计算好的质量,倒入预先准备好的小桶中,将小桶裹上保温层,置于加热板上;待桶中石油沥青温度上升至 180 ℃时,再将称好的 SBS 以少量、多次的方式快速地掺入桶中,并以 4 500 r/min 的转速,高速剪切 30 min,然后,对试件进行降温;

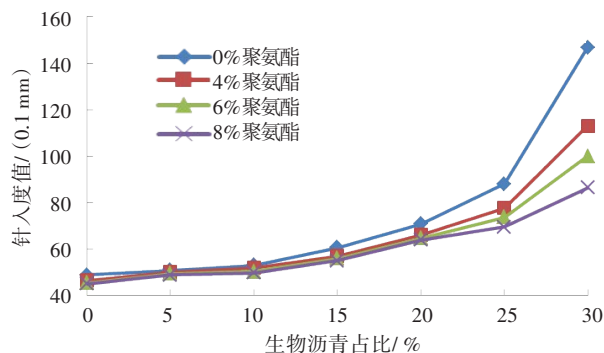
2) 当试件温度降低到 160 ℃时,加入生物沥青,将剪切速率降至 1 500 r/min,中速剪切 30 min;

3) 加入聚氨酯,继续以 1 500 r/min 的剪切速率,中速剪切 60 min,剪切完成后取样,将样品置于 160 ℃的烘箱中,保温 30 min 后,观察试样,确保该复合生物改性沥青试件不存在变质和离析的情况。

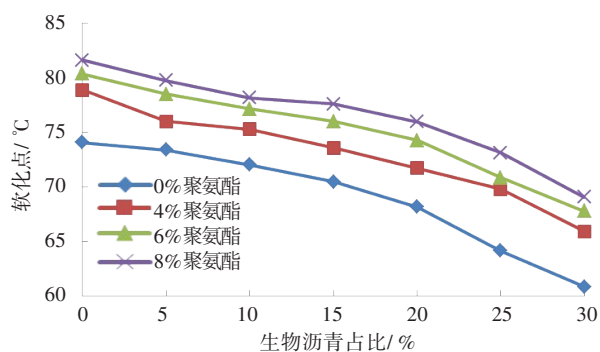
2 常规性能试验

本研究采用软化点作为生物沥青-聚氨酯复合改性沥青高温性能的指标,该指标具有操作简便、灵敏度高等优点;采用 5 ℃时的沥青延度^[29]作为生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的低温性能的指标。同时,对试件进行针入度试验与旋转薄膜加

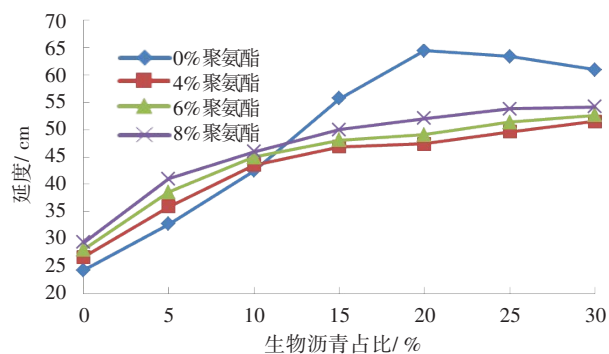
热试验(rolling thin film oven test, RTFOT),分析在不同聚氨酯掺量下的生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的常规性能,结果如图1所示。



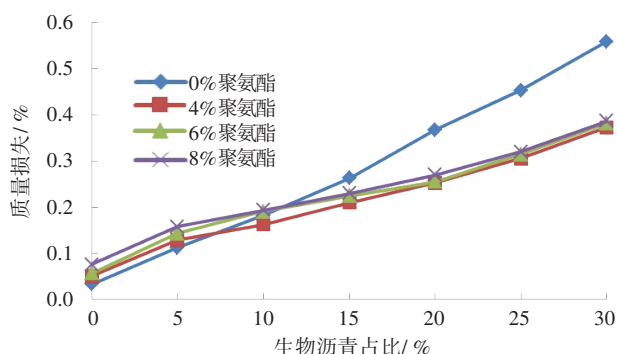
(a) 针入度值



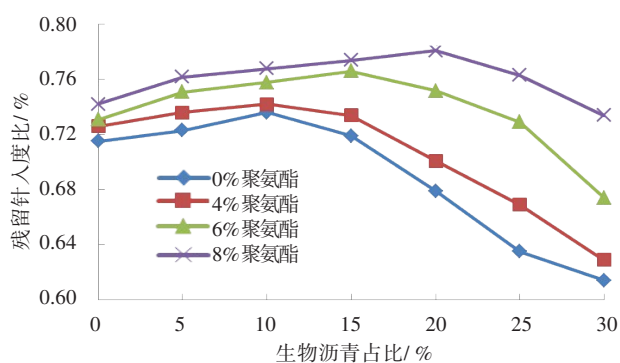
(b) 软化点



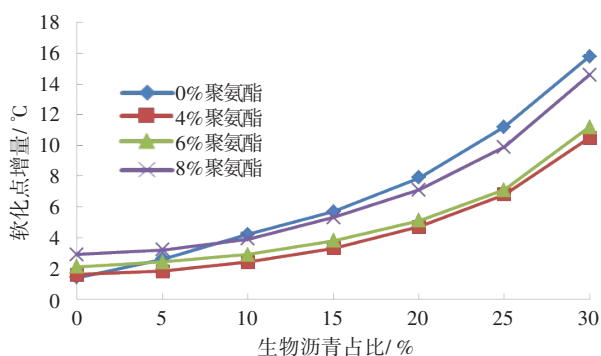
(c) 延度



(d) 质量损失



(e) 残留针入度比



(f) 软化点增量

图1 生物沥青/聚氨酯复合改性沥青常规性能指标

Fig. 1 Conventional performance indicators of biological asphalt/polyurethane composite modified asphalt

2.1 针入度试验

沥青稠度是沥青的主要性能指标之一,它可以反映沥青的软硬、稀稠程度,且与沥青的针入度成反比。一般来说,沥青稠度越大,其针入度越小、反之,稠度越小,其针入度也越大。从图1(a)可以发现,当生物沥青掺量提高时,试件的针入度在整体上呈增大的趋势,且生物沥青的掺量越高,试件的针入度增长速度越快,当生物沥青的掺量达到25%时,试件的针入度开始急剧增大。这表明生物沥青的掺入对试件的稠度存在不利的影响,生物沥青的掺量不宜超过25%。当生物沥青的掺量维持不变时,随着聚氨酯的增加,复合改性沥青试件的针入度总体上呈减小的趋势,表明聚氨酯对试件的稠度的提升起着促进的作用。

2.2 软化点试验

从图1(b)可以看出,随着生物沥青掺量的增加,试件的软化点逐渐下降,且生物沥青的掺量越高,试件的软化点下降的速度会加快。这表明生物

沥青对改性沥青的高温性能存在不利的影响。本次试验发现,当生物沥青与聚氨酯两者掺量的比例小于1.0:0.3时,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的高温性能改善效果较好。

2.3 延度试验

从图1(c)可以看出,在聚氨酯掺量为0%(即不掺入聚氨酯)的条件下,当生物沥青的掺量为20%时,试件在温度为5℃时的延度达到最大,之后,随着生物沥青掺量的增加,试件的延度呈逐渐下降的趋势。这表明生物沥青可以很好地提高生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的低温性能,但其掺量不宜过大。随着聚氨酯掺量从4%逐渐增加至8%,试件在温度为5℃时的延度总体上有小幅度提升,表明聚氨酯能提高生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的低温性能,但其对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青低温性能的提高程度不如生物沥青的。在本次试验中,所有试验组在温度为5℃时延度均大于对照组在温度为5℃时的延度,表明生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的低温性能均得到了不同程度的提高。

2.4 RTFOT老化试验

从图1(d)可以看出,随着生物沥青掺量的增加,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的质量在不断地减少。这是因为生物沥青含有很多在高温下容易挥发的物质。随着时间的流逝,在温度的作用下,这些物质不断地挥发到空气中,造成了试件质量的减少。

从图1(e)可以看出,随着生物沥青的加入,试件的残留针入度呈先缓慢增加,后迅速减小的变化趋势。这表明生物沥青的加入对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的抗老化性能有较好的提升作用,但其掺量不宜过大。当生物沥青掺量维持不变时,随着聚氨酯掺量的增加,试件的残留针入度比逐渐增大,表明聚氨酯的加入对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的抗老化性能有促进作用。

从图1(f)可以看出,随着生物沥青掺量的增加,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的软化点增量在不断地增加。在相同的生物沥青掺量下,不同聚氨酯掺量的生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的软化点增量排序从大到小依次是:0%掺量聚氨酯的试件>8%掺量聚氨酯的试件>6%掺量聚氨酯的试件>4%

掺量聚氨酯的试件。这表明生物沥青可以提高生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的老化性能。

3 黏度与流变试验

根据试件的常规性能试验结果,选取其中针入度和在温度为5℃时的延度两个指标均表现较好的试件作为试验组,进行黏度试验与流变试验。试验组试件是聚氨酯掺量分别为4%、6%,生物沥青掺量分别为5%、10%、15%、20%、25%的试件。

3.1 黏度试验

采用布氏黏度计,对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的黏度进行试验,测量试验组试件分别在135、150和175℃下的动力黏度,结果如图2所示。

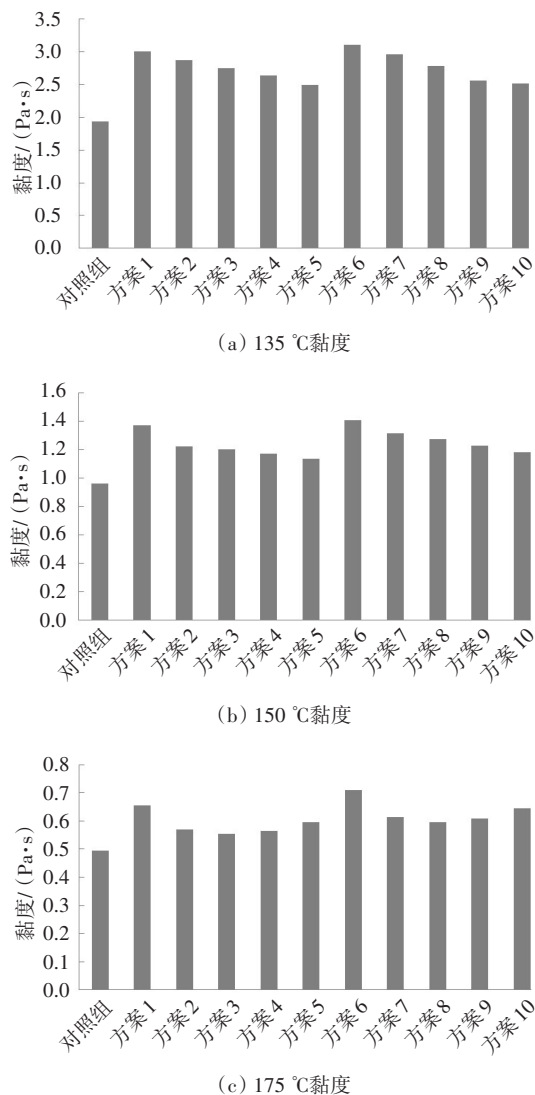


图2 各个温度下不同配比复合改性沥青运动黏度

Fig. 2 Kinematic viscosity of composite modified asphalt with different mix ratios at different temperatures

从图2可以看出,在135和150℃两种温度情况下,生物沥青的掺量越高,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的动力黏度越小。但当温度为175℃时,随着生物沥青的增加,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的动力黏度呈先小幅下降,再略微上升的趋势,但波动幅度不大。在相同的生物沥青掺量下,聚氨酯掺量越高,试件的动力黏度越高。在本次试验中,所有试验组试件的动力黏度均大于对照组试件的动力黏度。当温度为135℃时,试验组和对照组试件的动力黏度差值的绝对值最大,之后,随着温度的上升,试验组和对照组试件的动力黏度差值的绝对值逐渐变小。这表明在较高的温度下,生物沥青和聚氨酯均可提升试件的动力黏度,生物沥青和聚氨酯的复掺提高了生物沥青-聚氨酯复合改性沥青在高温时的抵抗剪切的性能,使其更难产生剪切变形。

3.2 高温流变试验结果分析

采用动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR),对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的试件进行高温流变试验,以评价生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的高温性能。当试验开始时,将温度设置为52℃。在温度扫描过程中,如果发现车辙因子小于1.0 kPa,则马上停止试验;否则,试验将继续进行。在试验中,将温度设置为按6℃/min的速度进行匀速升温,将加载频率 ω 设置为10 rad/s,将应变 γ 设置为12%。从试验开始,每隔1 min对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的复数剪切模量、相位角、车辙因子进行一次测量,并同时输出检测的数据,结果分别如图3~5所示。

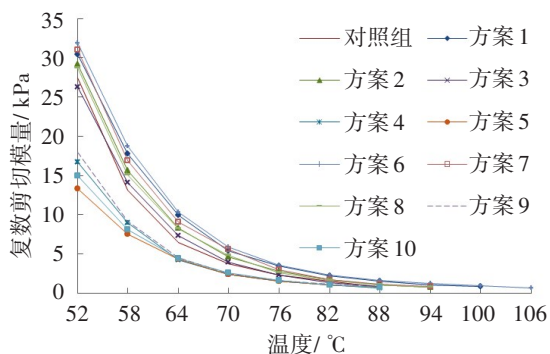


图3 不同配比复合改性沥青温度扫描复数剪切模量

Fig. 3 Complex shear modulus of temperature scanning of composite modified bitumen with different mix ratios

从图3可以看出,当生物沥青掺量分别为5%、10%时,无论聚氨酯掺量为多少,试件的复数剪切模量均大于对照组试件的复数剪切模量。当生物沥青掺量为15%,聚氨酯掺量为6%时,试件的复数剪切模量大于对照组试件的剪切模量。在相同的生物沥青的掺量下,聚氨酯掺量为4%试件的复数剪切模量均小于聚氨酯掺量为6%试件的复数剪切模量。当生物沥青掺量分别为20%、25%时,在本试验任一聚氨酯掺量下的试件的复数剪切模量均小于对照组试件的复数剪切模量。这表明随着生物沥青取代石油沥青掺量的增大,复合改性沥青在高温下受到反复剪切时产生的总抵抗变形能力是下降的,而聚氨酯则能弥补该缺点,聚氨酯可以提高复合改性沥青的抵抗剪切变形的能力。因此,当生物沥青与聚氨酯掺量的比例小于1.0:0.4时,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的抗剪切性能提升较为显著。

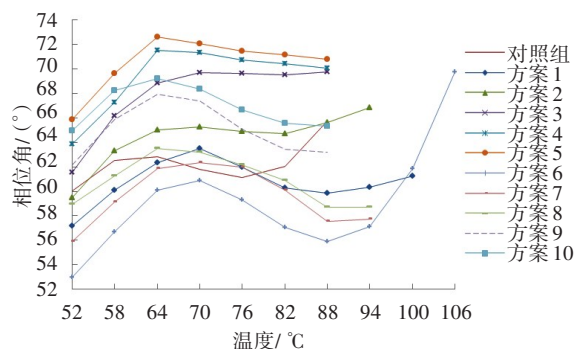


图4 不同配比复合改性沥青温度扫描相位角

Fig. 4 Temperature scanning phase angle of composite modified asphalt with different mix ratios

从图4可以看出,当温度低于94℃时,5%生物沥青+6%聚氨酯生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的相位角最小,25%的生物沥青+4%聚氨酯的生物沥青-聚氨酯复合改性沥青试件的相位角最大。当温度为88℃时,只有4%聚氨酯及掺量分别为15%、20%、25%生物沥青试件的相位角大于对照组试件的相位角。当聚氨酯掺量不变时,生物沥青掺量高的试件的相位角普遍大于生物沥青掺量低的试件的相位角。这表明聚氨酯的掺入起到了降低生物沥青-聚氨酯复合改性沥青相位角的作用;生物沥青则相反,它的掺入则起到了增大相位角的作用。

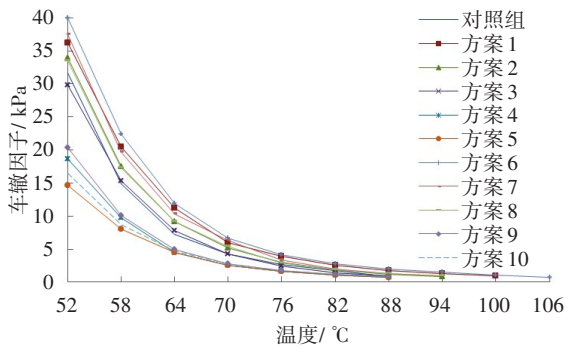


图5 不同配比复合改性沥青温度扫描车辙因子

Fig. 5 Composite modified asphalt temperature scanning rut factor with different mix ratios

从图5可以看出,无论聚氨酯和生物沥青的掺量为多少,随着温度的上升,试件的车辙因子均呈下降的趋势。当生物沥青掺量分别为5%、10%时,在同样的温度下,所有试验组的车辙因子均大于对照组的车辙因子。当生物沥青掺量分别为20%、25%时,在同样的温度下,试验组中4%聚氨酯掺量下的试件的车辙因子均小于6%聚氨酯掺量下的试件的车辙因子。在同样的温度条件下,15%生物沥青+6%聚氨酯试验组中试件的车辙因子大于对照组中试件的车辙因子。这表明随着生物沥青掺量的增加,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的高温流变性能是逐步下降的,而聚氨酯的掺入则可提高生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的高温性能。复掺生物沥青与聚氨酯可在一定程度上提高生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的高温流变性能,增强生物沥青-聚氨酯复合改性沥青在高温下抵抗车辙的能力。

综上所述,高温流变试验的结果进一步支持了常规性能试验结果中的关于生物沥青与聚氨酯掺量比例的结论:即当生物沥青与聚氨酯掺量的比例小于1.0:0.4时,试件高温流变性能提升较为显著。

3.3 低温流变试验结果分析

为进一步探究聚氨酯与生物沥青掺量对复合改性沥青低温性能的影响及两者掺量的比例,采用弯曲梁流变仪(bending beam rheometer, BBR)对试件进行低温流变试验。试验温度分别取为-24、-18和-12 °C。试验结果如图6~7所示。在图6~7中,当试验温度为-12 °C时,部分试件的变形较大,无法正常输出数据。

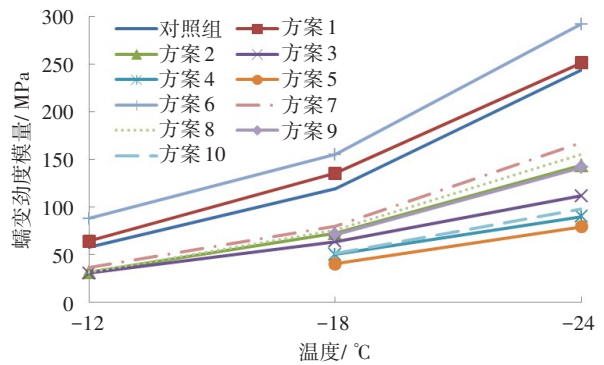


图6 不同配比复合改性沥青BBR试验蠕变劲度模量

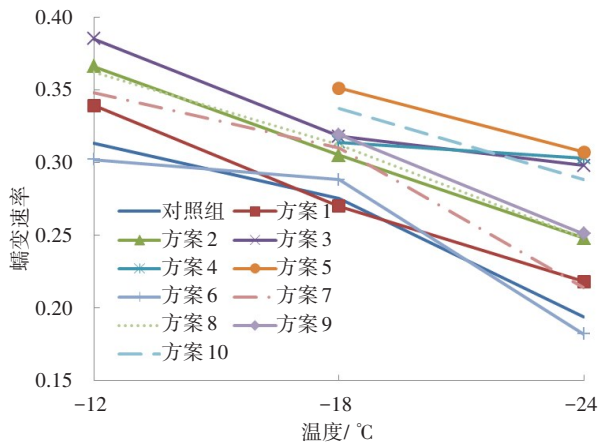
Fig. 6 s -value of BBR test for composite modified asphalt with different mix ratios

图7 不同配比复合改性沥青BBR试验蠕变速率值

Fig. 7 m -value of BBR test for composite modified bitumen with different mix ratios

一般来说,沥青的脆性与沥青的蠕变劲度模量成正比,即蠕变劲度模量越大,沥青脆性越大,其铺设的路面越容易发生开裂和破坏。沥青的蠕变速率则刚好相反,蠕变速率的大小与沥青的脆性成反比,即蠕变速率越大,当温度下降时,沥青路面产生收缩时的拉应力数值越小,路面发生低温开裂的可能性越小,反之亦然。

因此,在本次试验中,蠕变劲度模量的降低及蠕变速率增大均表明与普通的石油沥青路面相比,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青路面的低温抗裂性能得到了有效提升。掺量为5%生物沥青的试验组中的两组试件蠕变劲度模量均大于对照组试件的蠕变劲度模量,其余生物沥青掺量的试件蠕变劲度模量均小于对照组试件的蠕变劲度模量,且其蠕变速率与对照组试件的蠕变速率相当,其余生物沥青掺量的试件的蠕变速率均大于对照组试件的蠕变

速率。这表明,生物沥青能很好地提升生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的低温性能,且生物沥青的掺量越大,其对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青低温性能的提升效果越显著。当生物沥青掺量保持不变时,聚氨酯掺量越大的试验组,蠕变劲度模量越大,蠕变速率越小。这表明聚氨酯对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的低温性能的改善效果影响不显著。当生物沥青的掺量大于5%时,试验组中试件的低温性能普遍优于对照组中试件的低温性能,表明适当掺量的生物沥青对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的低温性能的提升有很好的促进作用。综合试验数据分析,推荐聚氨酯和生物沥青复掺的最佳掺量为:6%的聚氨酯+15%的生物沥青。

4 微观试验结果分析

4.1 红外光谱试验结果分析

红外光谱分析可应用于所有有机化合物的分析,其在定性、定量的结构分析方面有着广泛的应用。且其能提供物质较多的结构信息,用量少,分析速度快,不破坏试件,测量过程稳定。该法在组分分析中得到了较广泛的应用^[30]。本研究采用红外光谱仪对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青进行扫描,以对其组分进行分析和研究。选择15%的生物沥青+6%的聚氨酯的复掺试件(该复掺试件的高温、低温性能均较好)与20%生物沥青+4%的聚氨酯复掺试件(该复掺试件的低温性能较为优越)作为试验组,结果如图8所示。

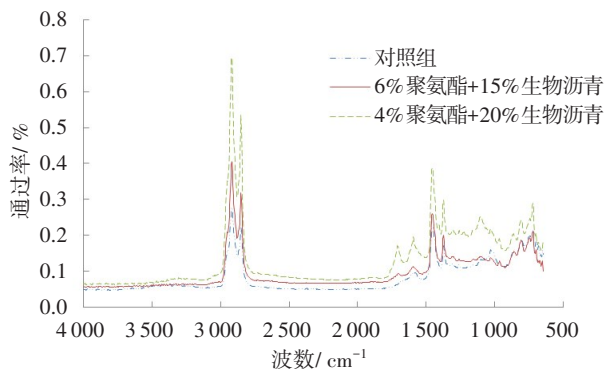


图8 红外光谱试验结果对比图

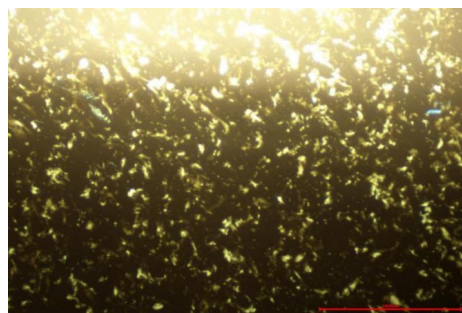
Fig. 8 Comparison of infrared spectroscopic test results

从图8可以看出,两试验组的红外光谱图在

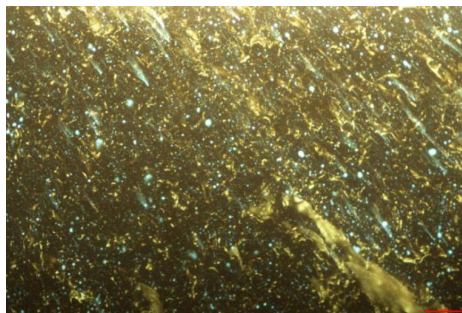
1 000~1 250、1 700±10 cm⁻¹两处均出现了不同的波峰。在1 000~1 250 cm⁻¹处,掺量为20%的生物沥青+掺量为4%的聚氨酯复掺试件的波峰十分突出,15%的生物沥青+6%的聚氨酯的复掺试件的波峰则较小;在1 700±10 cm⁻¹处,15%的生物沥青+6%的聚氨酯的复掺试件的波峰较为平缓,且整体强度也较小;而掺量为20%的生物沥青+掺量为4%的聚氨酯的复掺试件的波峰更为突出,强度也更大。对比不同掺量的生物沥青-聚氨酯改性沥青的红外光谱图,可以判断出聚氨酯与生物沥青及石油沥青之间发生了化学反应,在该复合沥青中存在化学改性的情况。

4.2 荧光显微镜试验结果分析

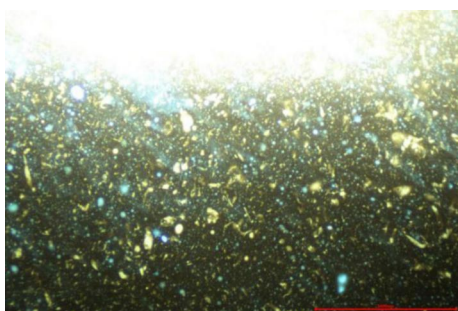
为探究生物沥青及聚氨酯在石油沥青中的分散情况,采用荧光显微镜对优选出的试验组(即4%聚氨酯+20%生物沥青、6%聚氨酯+15%生物沥青)与对照组进行分析,以便更直观地分析生物沥青-聚氨酯改性沥青试件的微观形貌。荧光显微镜是20世纪50年代发展起来的一种新型光学仪器,它利用光激发物质产生荧光的原理来显示各种物质的组成、结构及性质。荧光显微镜得到的试验组各试件的荧光图像如图9所示。



(a) 对照组



(b) 6% 聚氨酯+15% 生物沥青



(c) 4% 聚氨酯+20% 生物沥青

图9 生物沥青/聚氨酯复合改性沥青荧光显微图

Fig. 9 Fluorescence micrograph of bio-asphalt/polyurethane composite modified bitumen

在图9中,图9(a)为对照组,图9(b)~(c)均为试验组。在图9中,浅色物质为SBS在沥青中溶解后呈现的状态,黑色部分为石油沥青,SBS在石油沥青中形成了稳定的网状结构。图9(b)为15%生物沥青+6%聚氨酯的最佳掺量组,可以看到在SBS结构外,存在白色絮状物质,这是聚氨酯在复合改性沥青中的状态,结合在SBS形成的网状结构中,形成了一个稳定的混合结构。图9(c)为20%生物沥青+4%聚氨酯的试验组,该试验组试件的SBS与聚氨酯分布均匀,状态稳定。与对照组试件相比,两个试验组的试件均随着生物沥青的增加,颜色开始加深,这是生物沥青与石油沥青混合后的状态,表明在生物沥青-聚氨酯改性沥青的内部,生物沥青与石油沥青混合状态较为理想,没有出现混合不均匀、不相容或离析的现象。

5 结论

通过对生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的试验研究,得出结论:

1) 与对照组相比,生物沥青-聚氨酯复合改性沥青的针入度有所增大,其在5℃时的延度有较大幅度的提高,其抗老化性能也有小幅度提升,在一定配比范围内,沥青的软化点得到了提高;

2) 15%生物沥青+6%聚氨酯的复合改性沥青试件的高温流变性能优于对照组试件的高温流变性能,且该试件的低温流变性能提升幅度也较大;

3) 生物沥青-聚氨酯复合改性沥青内部存在化学改性的情况,沥青内部形成了以生物沥青和石油沥青混合物为主体介质、SBS呈网状分布、聚氨酯填充其间的稳定结构。

参考文献(References):

- [1] 曹雪娟,刘誉贵,曹芯芯,等.生物质重油与生物沥青制备及性能[J].长安大学学报(自然科学版),2019,39(3):27-35.DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.004. CAO Xuejuan, LIU Yugui, CAO Xinxin, et al. Preparation and properties of biomass heavy oil and bio-asphalt [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(3): 27-35. DOI: 10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.03.004.
- [2] 董泽蛟,周涛,栾海,等.SBS/橡胶粉复合改性SH型混合生物沥青工艺及机理[J].中国公路学报,2019,32(4):215-225. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.019. DONG Zejiao, ZHOU Tao, LUAN Hai, et al. Composite modification technology and mechanism of SH blended bio-asphalt by combining SBS with crumb rubber [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 215-225. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.04.019.
- [3] 王海成,金娇,刘帅,等.环境友好型绿色道路研究进展与展望[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2137-2169. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.004. WANG Haicheng, JIN Jiao, LIU Shuai, et al. Research progress and prospect of environment-friendly green road [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(7): 2137-2169. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.07.004.
- [4] 曾梦澜,夏颖林,祝文强,等.生物沥青、岩沥青及复合改性沥青常规性能与流变性能的相关性[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(11):131-136. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.11.015. ZENG Menglan, XIA Yinglin, ZHU Wenqiang, et al. Correlation between conventional performance and rheological performance of bio-asphalt, rock asphalt and composite modified asphalt [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(11): 131-136. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.11.015.
- [5] 冯学茂,张宇豪,韦慧,等.有机化蒙脱土改性生物沥青的流变性能研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(3):687-694. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200447. FENG Xuemao, ZHANG Yuhao, WEI Hui, et al. Research on rheological properties of organic

- montmorillonite modified bio-asphalt [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3): 687-694. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20200447.
- [6] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
- Review on China's pavement engineering Research·2020 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(10): 1-66. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.10.001.
- [7] 曾梦澜, 祝文强, 夏颖林, 等. 生物沥青及岩沥青复合改性沥青使用性能[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(5): 124-131. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.05.014.
- ZENG Menglan, ZHU Wenqiang, XIA Yinglin, et al. Performance of bio-asphalt and rock asphalt composite modified asphalt [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(5): 124-131. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2019.05.014.
- [8] 刘瑞瑞, 周涛, 谭婷, 等. 蓖麻基生物油对不同老化程度沥青的再生作用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2271-2281. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.06.017.
- LIU Ruirui, ZHOU Tao, TAN Ting, et al. Rejuvenation effect of castor-based bio-oil on asphalt with different aging levels [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2271-2281. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.06.017.
- [9] 刘涛, 郭乃胜, 金鑫, 等. 聚氨酯固-固相变材料改性沥青的流变性能与改性机理[J]. 中国公路学报, 2023, 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2023.01.002.
- LIU Tao, GUO Naisheng, JIN Xin, et al. Rheological properties and modified mechanism of polyurethane solid-solid phase change materials modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(1): 16-26. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2023.01.002.
- [10] 金鑫, 郭乃胜, 闫思檬, 等. 聚氨酯复合改性沥青的制备与性能研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 80-94. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.004.
- JIN Xin, GUO Naisheng, YAN Simeng, et al. Preparation and performance evaluation on polyurethane composite modified asphalt [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 80-94. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.03.004.
- [11] 徐培林, 张淑琴. 聚氨酯材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- XU Peilin, ZHANG Shuqin. Handbook of polyurethane materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [12] 吴建涛, 伍洋, 刘泉, 等. 预处理方法对聚氨酯再生沥青混合料性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 489-495. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.03.018.
- WU Jiantao, WU Yang, LIU Quan, et al. Effect of pretreatment methods on performance of polyurethane recycling asphalt mixture [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 489-495. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2021.03.018.
- [13] 郭桂宏, 丛林, 杨帆, 等. 聚氨酯材料在路面工程中的应用进展[J]. 公路交通科技, 2020, 37(6): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.06.001.
- GUO Guihong, CONG Lin, YANG Fan, et al. Application progress of polyurethane material in pavement engineering [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(6): 1-10. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.06.001.
- [14] 卜鑫德, 程烽雷. 聚氨酯-环氧复合改性沥青及其路用性能研究[J]. 公路, 2016, 61(8): 171-174.
- BU Xinde, CHENG Fenglei. Research on performance of polyurethane-epoxy resin compound modified asphalt and its mixture [J]. Highway, 2016, 61(8): 171-174.
- [15] 李添帅, 陆国阳, 梁栋, 等. 聚氨酯前驱体基化学改性沥青及其改性机理[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 45-59. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.004.
- LI Tianshuai, LU Guoyang, LIANG Dong, et al. Polyurethane-precursor-based chemically modified asphalt and its modification mechanism [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 45-59. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2021.10.004.
- [16] 徐宁, 汪海年, 陈玉, 等. 基于分子动力学的生物沥青相容性研究[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 65-72. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.210595.
- XU Ning, WANG Hainian, CHEN Yu, et al. Research on the compatibility of bio-asphalt based on molecular dynamics [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(5): 65-72. DOI: 10.12141/j.issn.1000-565X.210595.

- [17] 杨帆, 丛林, 龚红仁, 等. 热固性聚氨酯改性沥青桥面铺装材料制备及性能研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(7): 2841-2852.
- YANG Fan, CONG Lin, GONG Hongren, et al. Preparation and performance research of thermosetting polyurethane modified asphalt bridge deck pavement materials [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(7): 2841-2852.
- [18] 金鑫. TPU改性沥青及胶浆的流变特性与内在机制研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2021. DOI: 10.26989/d.cnki.gdlhu.2021.000107. JIN Xin. Study on rheological properties and inherent mechanism of TPU modified asphalt and mastic [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021.
- [19] BAZMARA B, TAHERSIMA M, BEHRAVAN A. RETRACTED: influence of thermoplastic polyurethane and synthesized polyurethane additive in performance of asphalt pavements [J]. Construction and Building Materials, 2018, 166: 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.093.
- [20] XU C, ZHANG Z Q, ZHAO F Q, et al. Improving the performance of RET modified asphalt with the addition of polyurethane prepolymer (PUP)[J]. Construction and Building Materials, 2019, 206: 560-575. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.101.
- [21] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 聚氨酯改性沥青研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3686-3694. DOI: 10.11896/cldb.18090011.
- JIN Xin, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. Research and development trends of polyurethane modified asphalt[J]. Materials Review, 2019, 33(21): 3686-3694. DOI: 10.11896/cldb.18090011.
- [22] 孙敏, 郑木莲, 毕玉峰, 等. 聚氨酯改性沥青改性机理和性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 49-58. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.02.005.
- SUN Min, ZHENG Mulian, BI Yufeng, et al. Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(2): 49-58. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2019.02.005.
- [23] 刘涛, 郭乃胜, 尤占平, 等. PUP/SBS复合改性沥青的高低温流变性能及改性机制[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023, 53(4): 672-681.
- LIU Tao, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. High- and low-rheological properties and modification mechanism of PUP/SBS composite-modified asphalt[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2023, 53(4): 672-681.
- [24] 史柯, 马峰, 宋瑞萌等. 基于分子模拟的废大豆油再生沥青扩散行为[J/OL]. 化工进展: 1-14[2023-10-07]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1107>.
- Shi Ke, Ma Feng, Song Ruimeng, et al. Diffusion behavior of recycled bitumen of waste soybean oil based on molecular simulation [J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress: 1-14[2023-10-07]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1107>.
- [25] ASLI H, AHMADINIA E, ZARGAR M, et al. Investigation on physical properties of waste cooking oil - Rejuvenated bitumen binder [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 398-405. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042.
- [26] ZARGAR M, AHMADINIA E, ASLI H, et al. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 233/234: 254-258. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.06.021.
- [27] 刘颖, 辛星. 道路用聚氨酯改性沥青的制备工艺研究[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 255-259. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.05.058.
- LIU Ying, XIN Xing. Study on preparation technology of polyurethane modified asphalt for road [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35 (5): 255-259. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2015.05.058.
- [28] 李彩霞. 聚氨酯改性沥青的制备及混合料路用性能评价[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41 (6): 958-963. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.06.014.
- LI Caixia. Preparation of polyurethane modified asphalt and research on road performance evaluation of mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(6): 958-963. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2017.06.014.
- [29] 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. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.014.
- SONG Kuanbin, WANG Xiaofeng, CHU Fuke, et al.

- [20] BATTINI J M. A non-linear corotational 4-node plane element [J]. Mechanics Research Communications, 2008, 35 (6) : 408-413. DOI: 10.1016/j. mechrescom. 2008. 03. 002.
- [21] 蔡松柏, 沈蒲生. 大转动平面梁有限元分析的共旋坐标法[J]. 工程力学, 2006, 23(增刊1): 69-72, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.z1.014.
- CAI Songbai, SHEN Pusheng. Co-rotational procedure for finite element analysis of plane beam under large rotational displacement [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(sup 1): 69-72, 68. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2006.z1.014.
- [22] 陈至达. 杆、板、壳大变形理论[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- CHEN Zhida. Large deformation theory of rod, plate and shell[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:郭一鹏)

(上接第101页)

- Formulation optimization of crumb rubber modified asphalt based on orthogonal test[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37 (4) : 14-19. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.04.014.
- [30] 樊超, 张广威, 高国华, 等. 基于红外光谱的干法SBS改性剂在沥青混合料中分散均匀性研究[J]. 公路与汽运, 2022 (1) : 54-56, 60. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-2668.2022.01.015.
- FAN Chao, ZHANG Guangwei, GAO Guohua, et al. Study on dispersion uniformity of dry SBS modifier in asphalt mixture based on infrared spectrum [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(1): 54-56, 60. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2022.01.015.
- (责任编辑:李脉;校对:欧兆虎;英文编辑:陈璐)