

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.014

文章编号:1672-9331(2022)04-0143-09

引用格式:叶群山,秦梦楠,张思敏.基于正交试验的桐油复合沥青再生剂组成设计研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):143-151.

Citation: YE Qunshan, QIN Mengnan, ZHANG Simin. Study on composition design of tung oil composite asphalt recycling agent based on orthogonal test[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 143-151.

基于正交试验的桐油复合沥青再生剂 组成设计研究

叶群山, 秦梦楠, 张思敏

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:【目的】深入研究桐油复合沥青再生剂对老化沥青的综合再生效果。【方法】以桐油、增塑剂、增黏树脂和有机蒙脱土(OMMT)为再生剂的主要原材料,通过正交试验方法,以再生沥青的软化点、25℃针入度、15℃延度和135℃黏度为评价指标,分析确定再生剂各原材料的最佳配比。通过动态剪切流变仪(DSR)试验、弯曲梁流变仪(BBR)试验对桐油复合沥青再生剂恢复老化沥青性能的可行性进行有效性验证。【结果】桐油复合再生剂中桐油、增塑剂、增黏树脂和OMMT的最佳质量配比为25:5:2:3;桐油复合沥青再生剂可以有效恢复老化沥青的性能至基质沥青的水平,且其高、低温流变性能均优于基质沥青的。【结论】研究成果可为后续开展桐油复合再生剂恢复老化沥青的抗老化性和微观结构等方面的研究提供一定的基础。

关键词:桐油复合沥青再生剂;正交试验;老化沥青;再生沥青;流变性

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

随着我国道路建设事业的迅速发展,沥青因优异的路用性能被广泛应用。但是,在复杂的交通环境、行车荷载等诸多因素的综合作用下,越来越多的沥青路面已经不能满足交通荷载的要求,从而产生了堆积如山的废旧沥青混合料^[1-2]。为了合理处置大量的旧料,恢复其路用性能,实现资源的可持续发展,废旧沥青混合料的再生技术受到高度关注^[3]。

沥青再生技术通过向回收的废旧沥青掺入一定比例的再生剂,利用再生剂实现废旧沥青的有效再生,从而减少资源浪费,保护环境^[4-5]。然而传统的再生剂很难达到理想的再生效果。另外,

由于国内不可回收资源的日益短缺,废旧沥青再生成本越来越高,对再生技术的发展造成制约性影响,所以,研发绿色环保经济型的再生剂以替代矿物石油尤为重要^[6]。

已有研究发现,将废植物油、废植物油脂、机油、蒸馏妥尔油、芳香提取物和一种专用再生剂6种再生剂与废旧沥青混合料混合后,可以使混合料的PG低温等级降低,抗疲劳性能提高^[5]。高文等^[7]研究了生物油对老化沥青自愈合性能的影响。ZAHOR等^[8]评估了废食用油作为再生剂对沥青黏合剂的机械、流变、化学以及沥青路面性能的影响。GONG等^[9]通过常规试验和微观技术测试并评价生物柴油渣在恢复老化沥青性能方面的优势,发现生物柴油渣可以提高再生沥青的低温抗裂性能。生物质重油对老化沥青的老化特性具

收稿日期:2022-01-08;修回日期:2022-03-10;接受日期:2022-03-21

基金项目:湖南省教育厅科学研究重点项目(20A012);长沙市科技计划项目(kq2014107);交通运输部道路结构和材料重点实验室计划项目(kfj140301)

通信作者:叶群山(1978—)(ORCID:0000-0002-8196-9109),男,副教授,主要从事路面新材料和新结构技术、沥青与沥青混合料、路面及桥面沥青加铺技术等方面的研究。E-mail:yequnshan@csust.edu.cn

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxxbzk/home>

有显著影响,可以起到降黏作用^[10]。废机油作为再生剂,可以恢复沥青的黏结性,使再生混合料的抗水损害的能力得到改善^[11]。综上所述,已有研究大多以单一的油分作为再生剂,然而单一的植物油或其他芳香化合物作再生剂,只能在沥青的流动性上有所改善,很难恢复或者提高废旧沥青混合料的整体性能。

桐油属于植物油,可作为一种天然轻质油分补充并平衡老化沥青的组分缺失^[12]。本研究用桐油、增塑剂、增黏树脂和有机蒙脱土(organic montmorillonite, OMMT)4种材料制备桐油复合沥青再生剂,通过正交试验设计方法确定各原材料的最佳配比,从而有效恢复以及提升老化沥青的性能。

1 材料与试验方法

1.1 再生剂原材料

1) 桐油:以脂肪酸甘油三酯为主要化学成分,含有大量化学极性酯基,与沥青具有很好的相容性,能够增强沥青的内部结构,提高其与沥青之间的黏附性。根据现行规范《桐油》(LY/T 2865—2017)测定桐油的技术指标,试验结果见表1。

表1 桐油技术指标

Table 1 Technical indexes of tung oil

技术指标	测试结果	再生剂建议值
外观	黄色液体	液体
密度/(g·cm ⁻¹)	0.943	实测记录
透明度(22℃室温下,静置24h)	透明	—
气味	具有桐油本身特有的气味	—

2) 增塑剂:增塑剂可以提高沥青的柔韧性,改善沥青的低温延展性和抗裂性。本研究选择邻苯二甲酸二辛酯(dioctyl phthalate, DOP)作为该桐油复合沥青再生剂的增塑剂。

3) 增黏树脂:增黏树脂可以提高沥青再生剂的黏度,对高温稳定性有利,也可以增加沥青轻质组分的稳定性,提高桐油复合沥青再生剂各材料之间的相容性,本研究选择C9石油树脂作为增黏树脂。

4) 有机蒙脱土(OMMT):为提高桐油复合沥

青再生剂的抗老化性能,本研究选择OMMT作为抗老化剂。

1.2 老化沥青与再生沥青

1.2.1 老化沥青

本试验采用的基质沥青是由湖南宝利沥青有限公司提供的70#石油沥青。老化沥青是通过模拟加速沥青老化试验制备而成的,具体操作步骤依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关要求,通过旋转薄膜烘箱加热试验(rotating thin film oven test, RTFOT)老化85 min,然后用压力老化容器(pressure aging vessel, PAV)加速沥青老化20 h,获得老化沥青(70a)。基质沥青与老化沥青的技术指标见表2。

表2 基质沥青与老化沥青技术指标

Table 2 Technical indexes of substrate asphalt and aged asphalt

项目	基质沥青	老化沥青	试验方法
针入度(25℃,100 g, 5 s)/(0.1 mm)	68.7	21.1	T0604
延度(15℃,5 cm/min)/cm	142.0	5.6	T0605
软化点(环与球法)/℃	48.0	65.6	T0606

1.2.2 再生沥青

再生沥青的试验样品是通过将老化沥青与桐油复合沥青再生剂混合而成的,桐油复合沥青再生剂的掺量分别为4%、8%和12%(按沥青质量计)。制备过程如下:在(135±5)℃温度下,利用高速剪切仪以3 000 r/min的剪切速率剪切20 min后,再以500 r/min的搅拌速率连续搅拌10 min。桐油复合沥青再生剂掺量为4%的再生沥青用70a-4T表示,以此类推,其余2个试样表示为70a-8T、70a-12T。

1.3 试验方法

动态剪切流变仪(dynamic shear rheometer, DSR)试验用于评价高温流变性,在42~72℃条件下,以加载频率 $\omega=10$ rad/s,应变控制为12%对沥青样品进行温度扫描试验。选用弯曲梁流变仪(bending beam rheometer, BBR)试验分别在-12、-18及-24℃温度下对沥青样品的低温抗裂性进行评估。

2 正交试验设计与分析

2.1 正交试验设计

本试验采用的桐油复合沥青再生剂由桐油、增塑剂、增黏树脂和 OMMT 四种原材料组成,正交试验设计因子水平见表 3。

2.2 桐油复合沥青再生剂正交试验直观分析

为确定各因素对再生沥青的影响程度,以再

生沥青的 25 ℃针入度、软化点、15 ℃延度、135 ℃黏度为评判指标,分析并确定各因素的最佳水平,试验结果见表 4。

表 3 正交因子水平表

Table 3 Orthogonal factor levels %				
水平	桐油(A)	增塑剂(B)	增黏树脂(C)	OMMT(D)
一	75	10	14	1
二	70	15	10	5
三	65	20	6	9

表 4 正交试验结果

Table 4 Orthogonal test results

试验号	桐油 (A)/%	增塑剂 (B)/%	增黏树脂 (C)/%	OMMT (D)/%	软化点/ ℃	25 ℃针入度/ (0.1 mm)	15 ℃延度/ cm	135 ℃黏度/ (mPa·s)
1	75	10	14	1	48.4	93.5	143.6	480.0
2	75	15	10	5	47.0	100.1	138.2	455.0
3	75	20	6	9	45.1	130.0	142.6	404.0
4	70	10	10	9	46.6	145.2	125.4	447.0
5	70	15	6	1	46.7	103.2	134.3	426.0
6	70	20	14	5	48.4	82.5	121.0	477.5
7	65	10	6	5	46.5	99.6	117.4	451.0
8	65	15	14	9	47.2	98.9	119.3	483.0
9	65	20	10	1	48.2	86.0	97.6	505.0

表 5 为正交试验结果直观分析表。表 5 中 k_1 、

k_2 、 k_3 为任一因素取同一水平所得试验结果的平均值, R 为极差, R 的大小可以显示不同因素对再生沥青性能影响的程度。

表 5 正交试验结果直观分析表

Table 5 Visual analysis of orthogonal test results

项目	统计参数	A	B	C	D	优选组合
软化点/ ℃	k_1	46.8	47.2	48.0	47.8	$A_1B_2C_3D_3$
	k_2	47.2	47.0	47.3	47.3	
	k_3	47.3	47.2	46.1	46.3	
	R	0.5	0.3	1.9	1.5	
25 ℃ 针入度/ (0.1 mm)	k_1	107.9	112.7	91.6	94.2	$A_2B_1C_3D_3$
	k_2	110.3	100.7	110.4	94.1	
	k_3	94.8	99.5	110.9	124.7	
	R	15.5	9.1	19.3	30.5	
15 ℃ 延度/ cm	k_1	141.5	128.8	128.0	125.2	$A_1B_2C_3D_3$
	k_2	126.9	130.6	120.4	125.5	
	k_3	111.4	120.4	131.4	129.1	
	R	30.1	10.1	11.0	3.9	
135 ℃ 黏度/ (mPa·s)	k_1	446.3	459.3	480.2	470.3	$A_1B_2C_3D_3$
	k_2	450.2	454.7	469.0	461.2	
	k_3	479.7	462.2	427.0	444.7	
	R	33.4	7.5	53.2	25.6	

2.3 桐油复合沥青再生剂配比优化

通过对均值 k_1 、 k_2 、 k_3 的比较,确定出以上几组最优组合方案,发现最佳方案并不一致。为反映各组分间的相互作用对桐油复合沥青再生剂整体最佳再生效果的影响,对各组分进行综合分析,对比分析各组分水平变化对各指标的影响,从而确定桐油复合沥青再生剂的最佳配比,各组分对各指标的影响见表 6。

从 15 ℃延度与软化点指标的变化趋势可分析得出(表 5~6),桐油掺量取 75% 最佳。由表 5 可知,桐油掺量为 70% 时 25 ℃针入度指标最佳,桐油掺量为 70%~75% 时,25 ℃针入度变化趋势相对较小,而 15 ℃延度、135 ℃黏度以及软化点变化幅度相对较大。因此,对再生沥青指标综合分析,本研究认为桐油的最佳掺量为 75%。

表6 各组分对各指标的影响

Table 6 The influence of each factor on each index

因素	软化点/ °C		25 °C针入度/ (0.1 mm)		15 °C延度/ cm		135 °C黏度/ (mPa·s)	
	数值	水平	数值	水平	数值	水平	数值	水平
桐油(A)	46.8	k_1	110.3	k_2	141.5	k_1	446.3	k_1
增塑剂(B)	46.9	k_2	100.7	k_2	130.6	k_2	454.7	k_2
增黏树脂(C)	46.1	k_3	110.9	k_3	131.4	k_3	427.0	k_3
OMMT(D)	46.3	k_3	124.7	k_3	129.1	k_3	444.7	k_3

由表5可知,随着增塑剂含量的增加,软化点与135 °C黏度指标均先降低后升高,25 °C针入度与15 °C延度指标均先升高后降低,这表明合理的增塑剂掺量可以改善老化沥青的性能,增塑剂的最佳掺量为15%。

在满足软化点最小、25 °C针入度和15 °C延度最大的前提条件下,增黏树脂和OMMT的最佳掺量分别为6%和9%。

根据正交试验综合分析可知,桐油复合沥青再生剂的最佳组合为 $A_1B_2C_3D_3$,即桐油、增塑剂、增黏树脂和OMMT的最佳掺量分别为75%、15%、6%和9%,因此复合再生剂中各组分的质量配比为25:5:2:3。

3 桐油复合沥青再生剂的再生性能验证

为了验证桐油复合沥青再生剂恢复老化沥青性能的可行性,本研究对70a-4T、70a-8T和70a-12T试样进行高、低温流变性能试验,评价桐油复合沥青再生剂的再生效果。

3.1 再生沥青的高温流变性

本研究采用DSR对基质沥青、老化沥青和不同掺量的再生沥青试样分别进行温度扫描试验。图1和图2所示为沥青试样在不同温度下的复数模量和相位角两个流变参数的试验结果。

3.1.1 复数模量与相位角

由图1可知,所有沥青试样的复数模量均随着温度的不断升高而逐渐降低。当温度在42~55 °C时,沥青试样的复数模量随温度的上升急剧下降,这表明在此温度范围内沥青的黏弹性状态受温度影响显著;当温度超过55 °C时,所有沥青试样的复

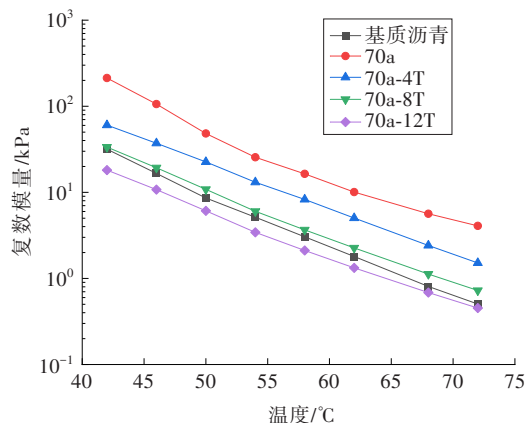


图1 不同沥青试样在不同温度下的复数模量

Fig. 1 Complex modulus of different asphalt specimens at different temperatures

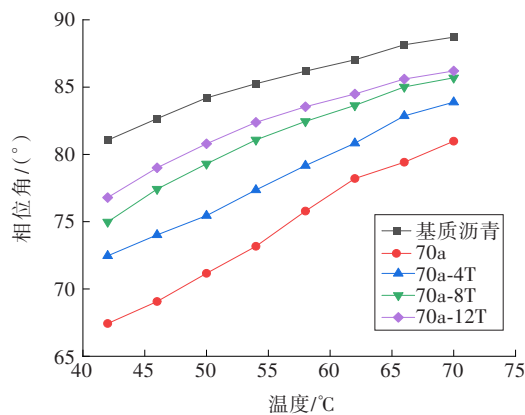


图2 不同沥青试样在不同温度下的相位角

Fig. 2 Phase angles of different asphalt specimens at different temperatures

数模量变化趋于平缓,这表明此温度阶段沥青处于黏性状态。老化沥青的复数模量最高,这表明老化使沥青变硬,温度敏感性升高^[11]。在老化过程中,沥青的沥青质组分增多,分子运动更加困难,其抵抗变形的能力增强,故沥青的复数模量增大。因桐油对大分子物质有溶解作用且可以补充

沥青的轻质组分,加入桐油复合沥青再生剂后,老化沥青变软,其复数模量减小。

随着桐油复合沥青再生剂掺量的增加,所有再生沥青的复数模量逐渐降低,这表明桐油复合沥青再生剂可以恢复老化沥青的流动性,使沥青抵抗变形的能力减小。70a-8T试样的复数模量与基质沥青的接近且高于基质沥青的,这表明桐油复合沥青再生剂可以恢复且提高老化沥青抵抗变形的能力。

由图2可知,随着温度的上升,所有沥青试样的相位角逐渐增大,且温度越高,相位角越接近 90° ,这表明在此阶段沥青的黏性组分增多,弹性组分减少。沥青老化后相位角减小,其抵抗变形的能力增强,随着桐油复合沥青再生剂的掺量的增加,再生沥青的相位角逐渐增加,但均小于基质沥青的,这表明再生沥青的内部弹性成分含量高于基质沥青的,其中70a-12T和70a-8T两种试样的相位角接近且远高于其他掺量,这与复数模量结果一致。

3.1.2 车辙因子

图3为不同掺量再生沥青的车辙因子试验结果。由图3可知,随着温度与桐油复合沥青再生剂掺量的升高,所有沥青试样的车辙因子逐渐降低,这表明桐油复合沥青再生剂的掺入及温度的升高均会降低沥青抵抗变形的能力。老化沥青的车辙因子最大,其抗车辙能力最强。随着桐油复合沥青再生剂掺量的增加,再生沥青的车辙因子逐渐降低并与基质沥青的接近,这表明桐油复合沥青再生剂的掺入使沥青的抗车辙性能变差。掺入过多的桐油复合沥青再生剂会导致再生沥青更容易产生车辙,但是合适的掺量能够保证再生沥青具有足够的抗车辙能力,70a-8T的车辙因子与基质沥青的十分接近。以 62°C 为例,从图4可以发现70a-8T的车辙因子比基质沥青的高27%,这表明桐油复合沥青再生剂能有效恢复老化沥青高温流动性,同时可以保证老化沥青具备优良的高温性能。

3.2 再生沥青低温流变性

本研究对基质沥青、老化沥青和不同掺量的再生沥青进行了BBR试验,试验温度为 -12°C 、 -18°C

和 -24°C 。不同试样的蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m 结果如图5所示。70a-12T在 -12°C 时变形过大导致试验终止,未获得测试结果。

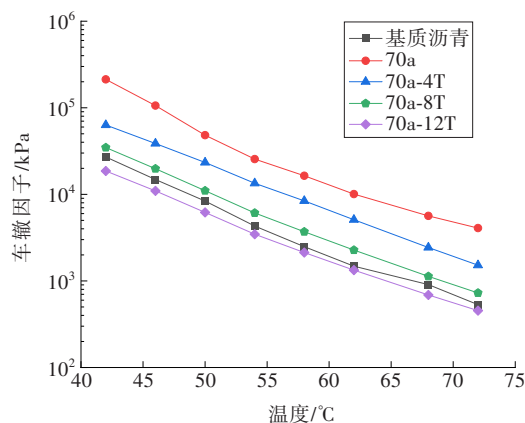


图3 不同沥青试样在不同温度下的车辙因子

Fig. 3 Rutting factors of different asphalt specimens at different temperatures

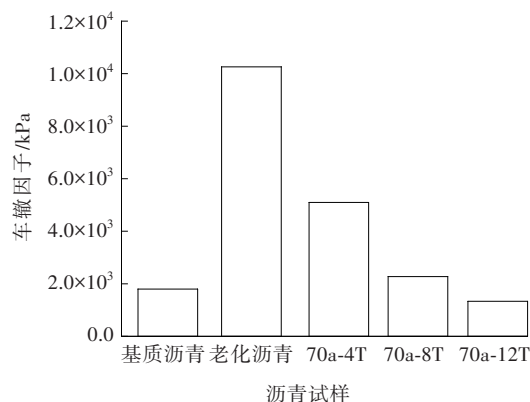
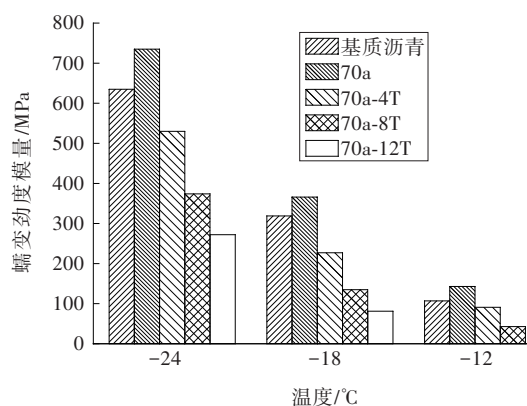


图4 62°C 时不同沥青试样的车辙因子

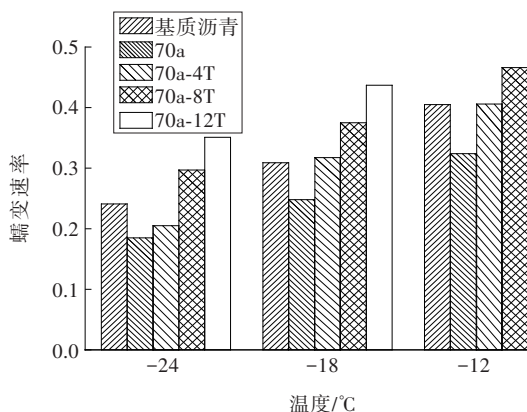
Fig. 4 Rutting factors of different asphalt specimens at 62°C

从图5(a)、5(b)可以看出,在相同温度下,老化沥青的蠕变劲度模量最大,蠕变速率最小,这表明老化沥青更容易产生开裂且释放应力的能力较差。随着桐油复合沥青再生剂掺量的增加,再生沥青均向基质沥青水平方向偏移,这表明桐油复合沥青再生剂的掺入可以有效恢复老化沥青的性能。当温度从 -12°C 降为 -18°C 或者由 -18°C 降至 -24°C 时,所有沥青试样的蠕变劲度模量均呈增加趋势,蠕变速率则均呈减小趋势,这表明沥青在低温条件下更容易产生开裂。与70a-4T试样相比,70a-8T和70a-12T的蠕变劲度模量较小、蠕变速率较大,这表明随着桐油复合沥青再生剂的增加,沥青的低温柔韧性越来越好,低温抗开裂性能逐渐

提高。与70#基质沥青相比,70a-8T试样在 -12°C 的蠕变劲度模量减小64.2 MPa、蠕变速率增大0.061;在 -18°C 时蠕变劲度模量减小184.0 MPa、蠕变速率增大0.066;在 -24°C 时蠕变劲度模量减小261.0 MPa、蠕变速率增大0.056。试验结果表明:桐油复合沥青再生剂不仅能使老化沥青的蠕变劲度模量和蠕变速率恢复至基质沥青的水平,且在最佳掺量下,再生沥青的低温抗裂性能优于基质沥青的。



(a) 蠕变劲度模量



(b) 蠕变速率

图5 不同沥青试样的蠕变劲度模量和蠕变速率

Fig. 5 Creep stiffness modulus and creep rate values of different asphalt specimens

4 讨论

4.1 本研究的依据和意义

随着时间的推移,沥青路面在阳光、雨水、氧气、交通荷载等的综合作用下,出现车辙、开裂和坑槽等病害。对路面进行养护、改建或重建后产

生了大量的废旧沥青混合料^[13-14],若直接抛弃这些废旧沥青混合料,既对环境造成极大的污染,也对资源造成严重的浪费。从环境和经济效益的角度而言,采用再生剂对废旧沥青混合料进行再生后再利用被认为是当下节约自然资源、保护环境和降低建设成本的最佳途径之一。研究表明采用再生剂可以实现理想的再生效果,从而有效延长路面的使用寿命^[15]。

沥青老化在本质上是软沥青的大量损失和大分子量沥青质的大量累积,沥青的柔韧性和流动性下降,严重影响道路的使用^[16-17]。沥青再生技术是通过向废旧沥青中加入一定比例的再生剂使其性能恢复的。添加轻质油是平衡化学成分和改善老化沥青的主要方法,而已有研究表明,含有大量酯基的桐油与沥青有较好的相容性^[18],可以作为天然轻质油分补充平衡老化沥青所缺失的组分,从而有效改善老化沥青的柔韧性和低温抗裂性。虽然单一的轻质油只能在一定程度上改善废旧沥青的流动性,难以恢复其高温流变性、抗老化性等综合性能,但为研究以桐油为基础油分的复合再生剂提供了试验依据。

4.2 本研究方法的特点

本研究选择桐油、增塑剂、增黏树脂和OMMT四种材料制备桐油复合沥青再生剂。桐油可以弥补沥青在老化过程中所流失的轻组分;增塑剂对沥青的柔韧性和低温抗裂性有利;增黏树脂可以改善桐油对高温流变性的不利影响,同时增强复合再生剂中各组分之间的相容性;OMMT可以改善沥青的抗老化性。桐油复合沥青再生剂不仅可以恢复老化沥青的流变性能,且其高、低温流变性能均优于基质沥青的。

在桐油复合再生剂各组分间协同作用的前提下,以桐油、增塑剂、增黏树脂和OMMT为主要因素,通过正交试验设计以再生沥青的软化点、 25°C 针入度、 15°C 延度和 135°C 黏度为评判指标,确定桐油复合再生剂各因素的最佳水平。本研究采用正交试验方法优化材料配比,既考虑了单因素对沥青性能的影响,也考虑了各因素之间的交互作用。本研究确定了再生剂的最佳配比及验证了桐油复合沥青再生剂恢复老化沥青性能的可行性,为将来研究桐油复合再生剂恢复老化沥青的抗老

化性、微观结构等方面提供了一定的基础。

本研究掺入OMMT作为抗老化剂,但未对再生沥青的抗老化性能进行验证,后续可开展桐油复合再生剂恢复老化沥青抗老化能力的研究。也可以向复合再生剂中加入一定量的紫外光吸收剂,进一步探寻各组份间的交互作用,全面提高桐油复合再生剂的再生效果。

4.3 今后的研究方向与设想

本文研究了桐油复合沥青再生剂的组成设计,但由于试验条件和时间等方面的限制,后续还需在以下方面进行完善:

1) 再生沥青与集料之间的黏附性是再生剂再生效果的重要评判指标之一,黏附性差易导致路面产生严重的水损害,黏附性降低易使沥青路面产生开裂、松散等病害。后续研究可基于表面自由能理论,通过定量法对桐油复合再生沥青与集料之间的黏附性进行评价。

2) 沥青作为一种复杂的有机高分子材料,其分子组成相当复杂,而再生剂的加入使再生沥青的化学成分发生了改变。因此,需要进一步观察再生沥青的微观结构,探究再生沥青的作用机理,从而更准确地认识再生沥青的特性。

3) 本研究的复合再生剂以轻质油分为主要成分,其热稳定性较石油基再生剂的差,因此有必要研究再生沥青在实际工程应用中的二次老化所带来的影响。

5 结论

本研究采用正交试验方法研究桐油复合沥青再生剂中各原材料的最佳配比,通过DSR、BBR试验验证桐油复合沥青再生剂对恢复老化沥青性能的可行性,得出以下结论:

1) 桐油复合再生剂中桐油、增塑剂、增黏树脂和OMMT的最佳质量配比为25:5:2:3。

2) 桐油复合沥青再生剂可以恢复老化沥青的流变性,且其优于70#基质沥青的,桐油复合沥青再生剂的最佳掺量为8%。

3) 桐油复合沥青再生剂可以有效恢复老化沥青的性能并达到基质沥青的水平,其高、低温流变

性均优于基质沥青的。

4) 本研究可为后续开展桐油复合再生剂恢复老化沥青的抗老化性和微观结构等方面的研究提供一定的基础。

〔参考文献〕

- [1] 郭猛,任鑫,焦峪波,等. 沥青及沥青混合料老化与抗老化研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 41-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.04.002.
GUO Meng, REN Xin, JIAO Yubo, et al. Review of aging and antiaging of asphalt and asphalt mixtures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 41-59. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2022.04.002.
- [2] 查旭东,闵斌,宋微. RAP掺量对热再生沥青混合料性能影响分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2013, 10(4): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2013.04.001.
ZHA Xudong, MIN Bin, SONG Wei. Influence analysis of RAP contents on performances of hot recycled asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2013, 10(4): 1-8. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2013.04.001.
- [3] HONG F, PROZZI J A. Evaluation of recycled asphalt pavement using economic, environmental, and energy metrics based on long-term pavement performance sections[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(8): 1816-1831. DOI: 10.1080/14680629.2017.1348306.
- [4] ZHOU C L, ZHENG C C, CHENG D X. Evaluation of environmental pollution from asphalt recycling technology[J]. Advanced Materials Research, 2014, 898: 482-485. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.898.482.
- [5] ZAUMANIS M, MALLICK R B, POULIKAKOS L, et al. Influence of six rejuvenators on the performance properties of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder and 100% recycled asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2014, 71: 538-550. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.073.
- [6] 曹雪娟,李志豪,张艳红,等. 沥青再生剂的再生性能改善与评价[J]. 应用化工, 2021, 50(4): 896-899. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20210207.010.
CAO Xuejuan, LI Zhihao, ZHANG Yanhong, et al. The improvement and evaluation of regeneration for asphalt rejuvenator[J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(4): 896-899. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20210207.010.
- [7] 高新文,刘朝晖. 生物油再生沥青自愈合机理分析[J].

- 中国公路学报, 2019, 32(4): 235–242. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.03.012.
- GAO Xinwen, LIU Zhaozhui. Self-healing mechanism of bio-oil recycled asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 235–242. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.03.012.
- [8] ZAHOOR M, NIZAMUDDIN S, MADAPUSI S, et al. Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: a comprehensive review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 278: 123304. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123304.
- [9] GONG M H, YANG J, ZHANG J Y, et al. Physical-chemical properties of aged asphalt rejuvenated by bio-oil derived from biodiesel residue[J]. Construction and Building Materials, 2016, 105: 35–45. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.025.
- [10] 石东晖. 生物质重油再生沥青胶结料性能研究[J]. 公路与汽运, 2018(1): 74–78. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2018.01.018.
- SHI Donghui. Study on properties of biomass heavy oil recycling asphalt binder[J]. Highways & Automotive Applications, 2018(1): 74–78. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2018.01.018.
- [11] 肖庆一, 王振波, 朱俊慧, 等. 再生剂对高掺RAP再生沥青混合料性能的影响[J]. 交通科学与工程, 2017, 33(1): 1–5, 37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.01.001.
- XIAO Qingyi, WANG Zhenbo, ZHU Junhui, et al. Effect of rejuvenator on high content RAP hot recycling asphalt performance[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(1): 1–5, 37. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.01.001.
- [12] YAN K Z, PENG Y, YOU L Y. Use of tung oil as a rejuvenating agent in aged asphalt: laboratory evaluations[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117783. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117783.
- [13] ZHAO K C, WANG Y H. Influences of aging conditions on the rheological properties of asphalt binders[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2020, 21(5): 653–665. DOI: 10.1080/10298436.2018.1502438.
- [14] ZHANG H T, LIU H W, ZHANG Z D. Study on the mechanism of the repeated asphalt ageing and recycling based on the macro-performance[J]. Road Materials and Pavement Design, 2016, 17(4): 920–932. DOI: 10.1080/14680629.2015.1120683.
- [15] BIEDERMANN A, JACOBI C. Keeping the asphalt in the road-experiences from different asphalt recycling technologies[J]. Advanced Materials Research, 2013, 723: 630–638. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.723.630.
- [16] 金大中, 钱国平, 白献萍, 等. 沥青紫外光老化研究进展[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 209–214. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.046.
- JIN Dazhong, QIAN Guoping, BAI Xianping, et al. Review on asphalt aging under ultraviolet[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(5): 209–214. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.046.
- [17] 杨震, 张肖宁, 虞将苗, 等. 基质沥青老化前后多尺度特性研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 420–425. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.03.012.
- YANG Zhen, ZHANG Xiaoning, YU Jiangmiao, et al. Study on multi-scale characteristics of matrix asphalt before and after aging[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 420–425. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.03.012.
- [18] 丁齐齐, 郭雅妮, 郭蓓, 等. 基于桐油的环氧沥青增容剂的合成与表征[J]. 武汉工程大学学报, 2018, 40(2): 180–185. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2869.2018.02.012.
- DING Qiqi, GUO Yani, GUO Bei, et al. Synthesis and characterization of epoxy asphalt compatibilizer based on tung oil[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2018, 40(2): 180–185. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2869.2018.02.012.

Study on composition design of tung oil composite asphalt recycling agent based on orthogonal test

YE Qunshan, QIN Mengnan, ZHANG Simin

(School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to study the comprehensive regeneration effect of multiple materials compound preparation of asphalt recycling agent on aged asphalt in depth. [Methods] Tung oil, plasticizer, tackifying resin, and organic montmorillonite (OMMT) were used as the primary materials for recycling asphalt. The softening point, 25 °C penetration, 15 °C ductility and 135 °C viscosity obtained from the regenerated asphalt were used as judgment indicators, and the recycling agent was optimized by orthogonal test design to analyze and determine the optimum ratio of each raw material. Dynamic shear rheometer (DSR) and bending beam rheometer (BBR) were used to effectively verify the feasibility of tung oil composite asphalt recycling agent to restore the performance of aged asphalt. [Findings] The optimum mass for tung oil composite regenerant components was 25: 5: 2: 3; the tung oil composite asphalt recycling agent can effectively restore the performance of aged asphalt, and the high- and low-temperature rheology was better than that of the matrix asphalt. [Conclusions] The research results can provide a certain basis for the follow-up research on the recovery of aging resistance and microstructure of aged asphalt with tung oil composite regenerant.

Key words: tung oil composite asphalt recycling agent; orthogonal test; aged asphalt; recycled asphalt; rheological property

Manuscript received: 2022-01-08; **revised:** 2022-03-10; **accepted:** 2022-03-21

Foundation item: Project (20A012) supported by Key Scientific Research Program of Education Department of Hunan Province; Project (kq2014107) supported by Science and Technology Plan Program of Changsha; Project (kfj140301) supported by Key Laboratory of Road Structure and Material of Ministry of Transport

Corresponding author: YE Qunshan (1978—) (ORCID: 0000-0002-8196-9109), male, associate professor, research interest: new pavement materials and new structure technology, asphalt and asphalt mixture, pavement and bridge deck asphalt surfacing technology. E-mail: yequnshan@csust.edu.cn

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)