

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.12.012

## 生物质油温拌沥青制备工艺及性能研究

李宁利<sup>1,2</sup>, 王思宇<sup>1</sup>, 栗培龙<sup>2</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室, 西安 710064)

**摘要:**关于生物质油温拌沥青制备工艺的研究较少,合理的制备工艺是生物质油温拌沥青性能发挥的重要保证。采用生物质油与 70#、90# 基质沥青制备温拌沥青,通过熵权 Topsis 法确定了生物质油温拌沥青的最佳制备工艺;通过动态剪切流变试验和弯曲梁流变试验评价了生物质油温拌沥青的高、低温性能;通过红外光谱与沥青四组分试验研究了生物质油温拌沥青的温拌机理,结果表明,生物质油温拌 90#、70# 基质沥青最佳制备工艺均为剪切温度 130 °C,剪切速率 1 500 r/min,剪切时间 10 min,发育时间 15 min;生物质油的掺加降低了沥青的高温性能,但提高了低温性能;生物质油与沥青混合过程主要为物理共混,生物质油提高了沥青胶团的分散度,导致沥青组分发生了迁移,使得沥青性能发生变化。

**关键词:**道路工程;温拌沥青;生物质油;制备工艺;流变性能;红外光谱;四组分

中图分类号:TB322

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)12-123-10

## Preparation technology and properties of biomass oil warm mix asphalt

LI Ningli<sup>1,2</sup>, WANG Siyu<sup>1</sup>, LI Peilong<sup>2</sup>

(1. School of civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, P. R. China; 2. Key Laboratory of Highway Structure and Materials, Chang'an University, Xi'an 710064, P. R. China)

**Abstract:** At present, there are few studies focusing on the preparation process of biomass oil warm mix asphalt. A rational preparation process is crucial to ensuring the performance of biomass oil warm mix asphalt. In this study, warm mix asphalt is prepared using biomass oil along with 70 #, 90 # base asphalt. The optimal preparation process of biomass oil warm mix asphalt is determined using the entropy weight Topsis method. The high and low-temperature performance of the biomass oil warm mix asphalt is evaluated by dynamic shear rheological test and bending beam rheological test. The warm mixing mechanism of biomass oil warm-mixed asphalt is studied using infrared spectroscopy and asphalt four-component test. The results show that the optimum preparation process for biomass oil warm-mixed 90 # and 70 # base asphalt involves a shear temperature of 130 °C, shear rate of 1500 r/min, shear time of 10 min and development time of 15 min. The addition of biomass oil reduces the high

收稿日期:2023-02-05

基金项目:长安大学重点科研平台开放基金项目(300102210510)。

Supported by the Open Fund Project of Key Scientific Platform of Chang'an University(300102210510).

作者简介:李宁利(1977—),女,副教授,主要从事道路工程研究,(E-mail)lnl808@hebut.edu.cn。

通信作者:栗培龙,男,博士,教授,(E-mail)lipeilong@chd.edu.cn。

temperature performance of asphalt, but improves its low temperature performance. The mixing process of biomass oil and asphalt mainly involves physical blending, improving the dispersion of asphalt micelles. This results in the migration of asphalt components, ultimately enhancing the asphalt performance.

**Keywords:** road works; warm mix asphalt; biomass oil; preparation process; rheological properties; infrared spectrum; four components

生物质油能够降低沥青的黏度及混合料施工温度,改善沥青的性能,并且价格低廉,绿色环保可再生<sup>[1-4]</sup>。Fini等<sup>[5]</sup>和 Mills-Beale等<sup>[6]</sup>研究发现,猪粪类生物质油可以降低石油沥青的黏度,提高了低温韧性及高温性能。Richardson等<sup>[7]</sup>研究结果发现,银胶菊茎叶生物质油提高了沥青混合料水稳定性。马峰等<sup>[8]</sup>和曹卫东等<sup>[9]</sup>研究发现,生物质油能够显著降低橡胶沥青黏度及沥青混合料的生产温度。张晗等<sup>[10]</sup>研究发现,废油类生物质油再生沥青的抗疲劳性能和低温性能与对应基质沥青性能相似。唐伯明等<sup>[11]</sup>研究表明,大豆毛油类生物质油的掺加降低了老化沥青中大、小分子含量,使得老化沥青的分散度提高,流动性增强,黏度降低。雷勇<sup>[12]</sup>和高新文等<sup>[13]</sup>研究发现,植物类生物质油能够提高沥青的针入度和延度,但对软化点、力学敏感性及老化沥青的部分自愈合性产生了不利影响。张佳运等<sup>[14]</sup>研究发现,地沟油生物质油提高了沥青的高、低温性能。孙朝杰<sup>[15]</sup>研究发现,废弃油脂类生物质油提高了沥青的施工和易性,降低了黏韧比和最大拉力。Cooper等<sup>[16]</sup>研究了松木木屑类生物质油对沥青混合料路用性能的影响,结果表明,松木木屑类生物质油的掺加提高了沥青混合料的水稳定性及低温抗裂性能。Hajj等<sup>[17]</sup>研究结果表明,生物质油的掺加提高了RAP混合料的低温抗裂性能。

综上所述,国内外关于生物质油的研究成果较多,主要集中在生物质油对沥青及沥青混合料路用性能影响等方面,由此可知,生物质油可以降低石油沥青的黏度,为生物质油用作温拌剂奠定了基础,目前将生物质油用作温拌剂的研究成果较少,生物质油温拌沥青制备工艺的研究还处于空白状态。文中通过熵权Topsis法研究了生物质油温拌沥青的制备工艺,分析了生物质油温拌沥青的性能及温拌机理,对生物质油温拌剂的应用进行了探索。

## 1 试验部分

### 1.1 主要原材料

1) 沥青: 90#、70#基质沥青,技术指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)的要求,如表1所示。

表1 沥青技术指标

Table 1 Technical indexes of asphalt

项目	90#基质沥青	70#基质沥青
25 °C针入度/0.1 mm	84.7	67.2
10 °C延度/cm	98.6	45.2
软化点/°C	47.5	49.7
质量损失/%	-0.193	-0.356
残留针入度比/%	68.32	65.52
残留延度/cm	> 8	> 6

2) 生物质油: 原料来源为地沟油,技术指标如表2所示。

表 2 生物质油技术指标

Table 2 Technical indexes of biomass oil

样品	常温形态	加热形态	灰分/ %	含水率/ %	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
生物质油	黏稠半膏状	流动状态	0.26	0.09	0.962

## 1.2 试验方法

首先,将盛有 90#、70#基质沥青的容器分别放入恒温烘箱中,将沥青烘至流动状态后,取出容器,放置于电磁炉上;然后,以生物质油作为沥青的温拌剂,分别以最佳掺量加入到 2 种基质沥青中。(在初拟工艺的条件下,通过研究生物质油掺量对 90#基质沥青、70#基质沥青黏度及三大指标的影响,分析 90#基质沥青、70#基质沥青黏度、针入度、软化点和延度的变化趋势,并对试验数据进行拟合,最终确定生物质油对 90#基质沥青、70#基质沥青的最佳掺量分别为 3.7%、3.5%)。

## 2 熵权 Topsis 法最佳制备工艺

采用 135 °C 黏度、针入度、延度、软化点作为评价指标,分别对不同工艺制备的生物质油温拌 90#、70#基质沥青进行 135 °C 黏度和三大指标试验,根据《沥青混合料添加剂》(JTT 860.6-2016)中的规定,黏度试验温度设定为 135 °C,转速和转子分别设定为 20 r/min 和 S27 号。针入度、延度和软化点试验具体操作按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中 T 0604-2011 的要求进行。由于篇幅的限制,以 90#基质沥青为例,阐述生物质油温拌沥青制备工艺的分析过程。

### 2.1 正交试验设计

选用生物质油温拌沥青制备过程中的 4 个关键因素,即剪切温度、剪切速率、剪切时间,发育时间拟定四因素三水平的正交试验设计,各因素及水平如表 3 所示,正交试验方案如表 4 所示。

表 3 正交试验因素水平表

Table 3 Factor level of orthogonal test

水平	影响因素			
	A 剪切温度/°C	B 剪切速率/(r·min <sup>-1</sup> )	C 剪切时间/min	D 发育时间/min
1	120	500	10	10
2	130	1 000	15	15
3	140	1 500	20	20

表 4 正交试验方案

Table 4 Orthogonal test scheme

试验号	A 剪切温度/°C	B 剪切速率/(r·min <sup>-1</sup> )	C 剪切时间/min	D 发育时间/min
1	120(1)	500(1)	10(1)	10(1)
2	120(1)	1 000(2)	15(2)	15(2)
3	120(1)	1 500(3)	20(3)	20(3)
4	130(2)	500(1)	15(2)	20(3)
5	130(2)	1 000(2)	20(3)	10(1)
6	130(2)	1 500(3)	10(1)	15(2)
7	140(3)	500(1)	20(3)	15(2)
8	140(3)	1 000(2)	10(1)	20(3)
9	140(3)	1 500(3)	15(2)	10(1)

黏度能够评价温拌沥青的降黏效果,三大指标的变化能够在一定程度上衡量温拌沥青的高低温性能,故采用135℃黏度、针入度、延度、软化点作为评价指标。按照表4的不同工艺制备的生物质油温拌90#基质沥青,进行135℃黏度和三大指标试验,每组方案进行4次平行试验,当某个测定值与平均值之差大于标准差的1.15倍时,则舍弃该值,取满足误差要求的试验结果,如表5所示。

表5 评价指标原始数据表  
Table 5 Original data of evaluation indicators

试验号	135℃黏度/(Pa·s)	针入度(25℃,0.1mm)	10℃延度/cm	软化点/℃
1	0.324	89.4	122.8	46.6
2	0.320	92.4	129	46.3
3	0.310	93.1	127.5	45.9
4	0.305	90.7	128.3	45.5
5	0.318	90.9	130.5	45.1
6	0.283	90.8	137.6	45.7
7	0.316	91.8	129.4	45.8
8	0.325	91.9	127.7	45.7
9	0.333	89.7	128.2	45.2

## 2.2 熵权 Topsis 分析法

采用赋权及逼近理想值解法(熵权 Topsis 法)对生物质油温拌沥青制备工艺进行综合考量,优选出生物质油温拌沥青最佳制备工艺。熵权法是通过计算各个方案评价指标的权重来确定各个指标差异程度的方法,可以有效消除人为因素、模糊随机性因素等产生的影响,确定各个评价指标权重,Topsis称为逼近理想解排序方法,通过对原始数据矩阵进行归一化处理,确定理想中的最佳方案和最差方案,求出各被评价方案与最佳方案和最差方案之间的加权欧氏距离,得到该方案与最佳方案的相对贴进度,并以此作为评价被评对象优劣的依据和标准<sup>[18]</sup>。熵权 Topsis法具体步骤如下:

### 1) 建立指标判断矩阵

设有  $m$  个评价对象(实验方案),  $n$  个评价指标(各单项评价指标),则各待评试验方案的评价指标值可组成矩阵  $A = (a_{ij})_{m \times n}$ , 即

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \circ$$

### 2) 评价指标的矩阵规范化

效益型评价指标,令

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{a_{ij} - \min_j a_{ij}}{\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}}, & \max_j a_{ij} \neq \min_j a_{ij} \\ 1, & \max_j a_{ij} = \min_j a_{ij} \end{cases}, \quad (1)$$

成本型评价指标,令

$$y_{ij} = \begin{cases} \frac{\max_j a_{ij} - a_{ij}}{\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}}, & \max_j a_{ij} \neq \min_j a_{ij} \\ 1, & \max_j a_{ij} = \min_j a_{ij} \end{cases}, \quad (2)$$

根据式(1)和(2)将全部指标均转化为统一的、无量纲的效益型评价指标,最终得到标准化指标矩阵  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ 。135 °C黏度越小,温拌效果越好,黏度试验结果中最小值为最优值;25 °C针入度在 80~100 (0.1 mm)之间,在此范围内,针入度最小值为最优值;10 °C延度越大,说明沥青的低温性能越好,延度试验结果中最大值为最优值;软化点越高,说明沥青的高温稳定性越好,软化点试验结果中最大值为最优值。根据式(1)和(2)将原始评价矩阵标准化,得到规范化数据表,如表 6 所示。

表 6 规范化数据表  
Table 6 standardized data

试验号	135 °C黏度/(Pa·s)	针入度(25 °C,0.1mm)	10 °C延度/cm	软化点/°C
1	0.06	0.22	0.00	0.25
2	0.08	0.04	0.11	0.20
3	0.14	0.00	0.08	0.14
4	0.17	0.14	0.10	0.07
5	0.09	0.13	0.14	0.00
6	0.31	0.13	0.27	0.10
7	0.10	0.08	0.12	0.12
8	0.05	0.07	0.09	0.10
9	0.00	0.20	0.10	0.02

3)熵权法计算指标权重

设制备工艺方案数为  $m$ ,评价指标数为  $n$ ,形成原始指标矩阵  $A = (A_{ij})_{m \times n}$ ,通过指标标准化得到  $Y = (y_{ij})_{m \times n}$ ,对于某个指标  $j$ ,它的熵为

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m P_{ij} * \ln P_{ij}, j=1, 2, \dots, n, \tag{3}$$

式中,  $P_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^m y_{ij}}, k = \frac{1}{\ln m}$ 。

设第  $j$ 项待评价指标的熵权值为  $w_j$ ,则

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum_{j=1}^n E_j}, j=1, 2, \dots, n, \tag{4}$$

式中,  $0 \leq w_j \leq 1, \sum_{j=1}^n w_j = 1$ 。

由式(3)和式(4)可知,对于某个评价指标,产生的变异程度越大,能够提供更多的信息,在评价体系中就发挥着更大的作用,对应的熵值就越小,同时权重值也就越大。在上式中,当  $P_{ij}$ 为 0 时,为了使得式  $\ln P_{ij}$ 有意义,假设  $P_{ij} = 0$  时,  $P_{ij} \ln P_{ij} = 0$ ,计算结果如表 7 所示。

表 7 权重数据表  
Table 7 Weight data

项目	135 °C黏度/(Pa·s)	针入度/(0.1 mm)	10 °C延度/cm	软化点/°C
$E_j$	0.868	0.896	0.909	0.870
$1-E_j$	0.132	0.104	0.091	0.130
$W_j$	0.289	0.228	0.199	0.284

最终计算得到指标权重为:  $WS = (0.289, 0.228, 0.199, 0.284)$ 。

$w$ 的确定取决于各待评路段的固有信息,称为客观权重,作为 TOPSIS 评价的权重系数确定出各评价指标的权重后,为主对角线上的元素构造主对角矩阵  $W$ :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} \circ$$

将各指标的熵权与标准决策矩阵相乘得到加权标准决策矩阵  $u = (u_{ij})_{m \times n}$

$$u = Y \times W = u_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 y_{11} & \cdots & w_m y_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 y_{m1} & \cdots & w_n y_{mn} \end{bmatrix} \circ$$

#### 4) 确定评价对象的正理想解和负理想解

根据式(5)(6)确定评价方案的正理想解和负理想解,计算结果如表8所示。

$$u^+ = (u_1^+, u_2^+, \cdots, u_n^+)$$

$$u^- = (u_1^-, u_2^-, \cdots, u_n^-)$$

其中,

$$u_j^+ = \begin{cases} \max(r_{ij}), j \in J^+ \\ \min(r_{ij}), j \in J^- \end{cases} \quad j = 1, 2, \cdots, n, \quad (5)$$

$$u_j^- = \begin{cases} \min(r_{ij}), j \in J^+ \\ \max(r_{ij}), j \in J^- \end{cases} \quad j = 1, 2, \cdots, n, \quad (6)$$

式中:  $J^+$  为效益型评价指标,  $J^-$  为成本型评价指标, 对指标进行了标准化后都统一为效益型指标。

表8 正负理想解

Table 8 Positive and negative ideal solutions

项目	135 °C黏度/(Pa·s)	针入度(25 °C, 0.1 mm)	10 °C延度/cm	软化点/°C
$u^+$	0.290	0.227	0.198	0.284
$u^-$	0	0	0	0

#### 5) 计算理想点距离

计算各被评估工艺制备方案指标数值与正理想解、负理想解的距离  $S_i^+$  和  $S_i^-$ 。

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (r_{ij} - u_j^+)^2}, \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad (7)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (r_{ij} - u_j^-)^2}, \quad i = 1, 2, \cdots, m, \quad (8)$$

式中,  $w_j \in W = (w_1, w_2, \cdots, w_n)$  为2.2中计算得到的熵权值。

#### 6) 确定相对接近度

根据式(9)计算相对接近度  $C_i$ , 计算结果如表9所示。

$$C_i = \frac{S_i^+}{(S_i^+ + S_i^-)}, \quad i = 1, 2, \cdots, m. \quad (9)$$

表9 相对接近度数据表

Table 9 Relative closeness data

试验号	$S^+$	$S^-$	$C_i$
1	0.310	0.368	0.543
2	0.311	0.257	0.453
3	0.335	0.211	0.387
4	0.286	0.244	0.460
5	0.373	0.191	0.338

续表 9

试验号	$S^+$	$S^-$	$C_i$
6	0.191	0.396	0.674
7	0.306	0.204	0.400
8	0.360	0.158	0.304
9	0.413	0.222	0.350

依据相对贴近度的大小对各个评价方案进行排序,据此对各个制备方案进行决策, $C_i$ 越大,说明该制备方案越好。由表 9 可知,这 9 种方案中,方案 6 的相对贴近度  $C_i$  最大,所以生物质油温拌 90# 基质沥青的最佳工艺为:剪切温度 130 °C,剪切速率 1 500 r/min,剪切时间 10 min,发育时间 15 min。

生物质油温拌 70# 基质沥青最佳工艺研究过程同上,分析可知最佳工艺为:剪切温度 130 °C,剪切速率 1 500 r/min,剪切时间 10 min,发育时间 15 min。

### 3 生物质油温拌沥青路用性能研究

#### 3.1 动态剪切流变试验结果分析

相位角  $\delta$  越小,复数剪切模量  $G^*$ 、车辙因子  $G^*/\sin \delta$  越大,则沥青的高温性能就越好。通过 DSR 试验研究在最佳工艺下,90# 原样沥青、70# 原样沥青、90# 温拌沥青、70# 温拌沥青  $G^*$ 、 $\delta$  与温度的关系,结果如图 1 和图 2 所示。

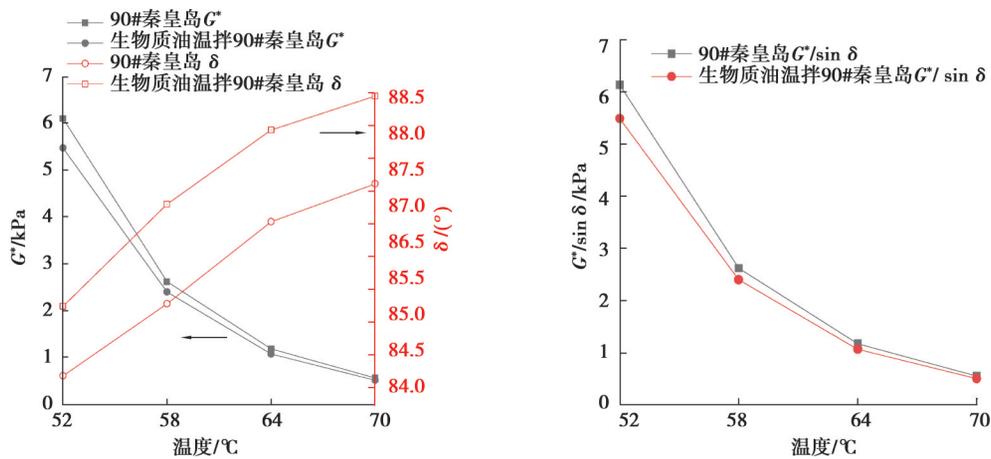


图 1 90# 沥青  $G^*$ 、 $\delta$ 、 $G^*/\sin \delta$  与温度的关系

Fig. 1 Relationship of 90# asphalt  $G^*$ 、 $\delta$ 、 $G^*/\sin \delta$  with temperature

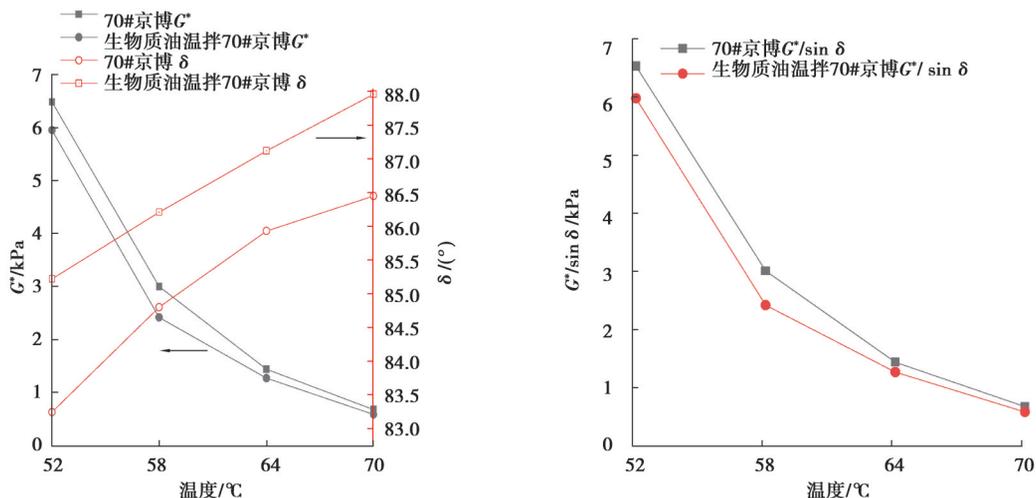


图 2 70# 沥青  $G^*$ 、 $\delta$ 、 $G^*/\sin \delta$  与温度的关系

Fig. 2 Relationship of 70# asphalt  $G^*$ 、 $\delta$ 、 $G^*/\sin \delta$  with temperature

可以看出,随着温度的升高,90#、70#基质沥青,生物质油温拌90#、70#沥青的复数剪切模量 $G^*$ 均逐渐减小、相位角 $\delta$ 均逐渐增大,这是因为沥青中的弹性部分受高温影响逐渐转化为黏性部分,从而削弱了变形恢复能力,影响了沥青的抗变形能力。在相同的温度下,生物质油温拌90#、70#基质沥青相比于90#、70#基质沥青,相位角 $\delta$ 升高,复数剪切模量 $G^*$ 降低,说明生物质油温拌剂的掺入降低了90#、70#基质沥青的高温性能。沥青高温性能降低的原因可能是生物质油中的轻质油分对沥青起了稀释作用,提高了沥青流动性,同时也使得沥青变软,导致沥青高温性能下降。这与软化点试验结果相符。

可以看出,在52~58℃的温度范围内,车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 下降的速率较快;说明在此温度下,90#、70#基质沥青的高温性能损失速率较快,在58~70℃的温度范围内,车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 下降速率逐渐减慢;在温度达到70℃时,高温性能逐渐趋于稳定。在相同的温度下,生物质油温拌90#、70#基质沥青相比于90#、70#基质沥青,车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 变低,说明生物质油温拌剂的掺入降低了90#、70#基质沥青的高温性能,但对沥青的高温性能等级并没有产生影响,说明其对路用性能影响较小。

### 3.2 低温小梁弯曲试验结果分析

蠕变劲度 $S$ 越小,蠕变速率 $m$ 越大,沥青的低温性能就越好。通过BBR试验研究在最佳工艺下,90#、70#基质沥青、温拌沥青的低温性能,结果如表10所示。

表10 BBR试验结果  
Table 10 BBR test results

沥青种类	-6℃		-12℃		-18℃	
	$S/\text{MPa}$	$m$	$S/\text{MPa}$	$m$	$S/\text{MPa}$	$m$
70#基质沥青	58	0.431	114	0.368	266	0.283
70#基质沥青+油	47	0.472	103	0.381	250	0.313
90#基质沥青	48	0.467	185	0.379	394	0.292
90#基质沥青+油	41	0.486	166	0.386	376	0.321

从表10可以看出,在-6℃~18℃的温度范围内,随着温度的降低,90#、70#基质沥青、生物质油温拌90#、70#沥青的蠕变劲度 $S$ 值增加,蠕变速率 $m$ 值降低,说明温度越低,沥青的低温抗裂性越差。在相同的温度下,生物质油温拌90#、70#基质沥青相比于90#、70#基质沥青,蠕变劲度 $S$ 减小,蠕变速率 $m$ 增大,说明生物质油温拌剂的掺入提高了90#、70#基质沥青的低温性能,这与延度试验结果相符。

## 4 生物质油温拌沥青温拌机理研究

### 4.1 红外光谱试验结果分析

采用德国BRUKER TENSOR 27型傅里叶变换红外光谱仪研究沥青试样的官能团分布情况,测试步骤为:将沥青溶于三氯乙烯中(质量分数约5%),再蒸发掉三氯乙烯,得到沥青薄膜即可进行测试。特征峰对应着官能团的类型,可以通过特征峰的形状、数目等参数推测出沥青中的官能团的种类。如图3所示,红外光谱图中可以分为2个区域,其中一个区域是4 000~1 350  $\text{cm}^{-1}$ ,该区域内的特征峰是由官能团中分子键伸缩振动引起的;另一个区域是1 350~650  $\text{cm}^{-1}$ ,该区域中特征峰众多或分子结构稍有不同均能导致特征峰的不同,被称作指纹区,可以通过该区域的特征峰进行样品鉴别<sup>[19]</sup>。

可以看出,掺入生物质油温拌剂后的90#沥青与未掺入生物质油温拌剂的90#基质沥青图谱相比,在842  $\text{cm}^{-1}$ 、933  $\text{cm}^{-1}$ 、1 377  $\text{cm}^{-1}$ 、1 460  $\text{cm}^{-1}$ 、2 853  $\text{cm}^{-1}$ 、2 924  $\text{cm}^{-1}$ 处的特征峰强度略有差别。掺入生物质油温拌剂后的70#基质沥青与未掺入生物质油温拌剂的70#基质沥青图谱相比,在1 377  $\text{cm}^{-1}$ 、1 460  $\text{cm}^{-1}$ 、2 853  $\text{cm}^{-1}$ 、2 924  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰强度略有差别。出现以上差别的原因与测定样品时的溶剂及温度有关,在进行红外光谱试验时,样品的外部客观条件难以严格控制,导致相同位置特征峰的强度不同<sup>[20]</sup>。

掺入生物质油温拌剂后的90#、70#基质沥青均未出现新的特征峰,主要特征峰出现的位置与原样沥青相比基本没有变化,即生物质油温拌剂与90#、70#基质沥青混合过程中没有出现新的官能团,因此,生物质油温拌剂与90#、70#基质沥青混合过程主要为物理变化。

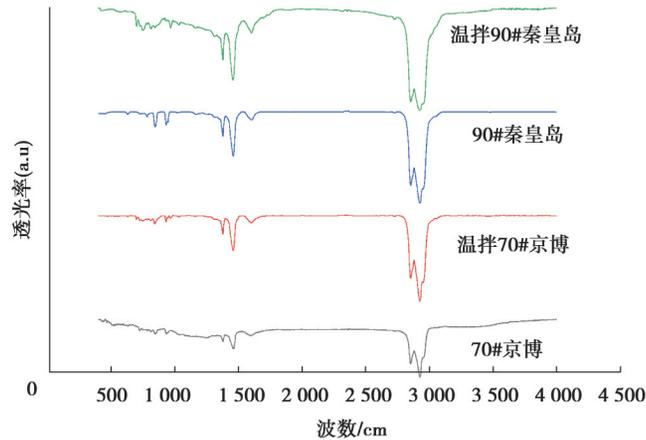


图3 红外光谱图

Fig. 3 infrared spectrum

#### 4.2 沥青四组分试验结果分析

通过沥青四组分法,对生物质油,3种石油沥青,掺加生物质油70#、90#石油沥青进行成分组成分析,将其分成连续的4个组分,饱和分、芳香分、胶质、沥青质,通过组分的变化分析生物质油作用机理,结果如表11所示。采用上海昌吉SYD-0618B型四组分试验仪器测定沥青的四组分含量,具体试验操作按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)中T 0619-1993的要求进行。

表 11 四组分分析结果

Table 11 Four component analysis results

样品种类	各组分含量/%			
	饱和分	芳香分	胶质	沥青质
90#基质沥青	18.23	43.95	27.29	10.53
生物质油温拌90#基质沥青	19.15	44.22	30.22	6.41
70#基质沥青	18.37	39.68	26.09	15.86
生物质油温拌70#基质沥青	20.43	41.77	28.23	9.57

为了更好地研究生物质油对沥青性能的影响,引入胶体模型,具体如下:Pfeiffer认为胶束中心为极性最强的沥青质,其内部或表面吸附有可溶质,可溶质中分子量越大、芳香性越强的分子质点越靠近胶束中心,周围又吸附一些轻质组分,连续地过渡到胶束间相,沥青中亲液的胶质包围着憎液的沥青质形成胶团,其中胶质的极性部分朝向沥青质核,非极性部分朝向外围。

根据表11分析可知,生物质油作用机理为:生物质油中含有较多的饱和分,特点是分子量小、极性低,生物质油与基质沥青混合后,生物质油中低极性成分使得沥青胶团体系周围低极性区域面积增大,沥青胶团外围的非极性部分与生物质油中低极性成分相溶趋势大于原沥青中的芳香分、饱和分,使得沥青胶团体系引力场变小,沥青胶团体系的分散程度增大,沥青胶团变得分散,从而导致沥青流动性增强,黏度降低。同时,也使得90#沥青组分之间重新分配,宏观表现为物理性能指标的改变,即黏度、软化点减小,针入度、延度增大。

## 5 结 论

采用正交试验及熵权Topsis分析法,研究生物质油温拌90#、70#基质沥青的制备工艺,并对生物质油温拌沥青的路用性能和温拌机理进行了分析,结论如下:

- 1) 生物质油温拌90#、70#基质沥青的最佳制备工艺均为:剪切温度130℃,剪切速率1500 r/min,剪切时间10 min,发育时间15 min。
- 2) 掺加生物质油温拌剂后,90#、70#基质沥青高温性能均降低,但低温抗裂性能均提高。
- 3) 生物质油与90#、70#基质沥青混合的过程主要为物理变化。

4) 生物质油具有较高含量的饱和分, 沥青胶团体系周围出现了非极性区域, 削弱了沥青胶团体系的引力场, 增加了沥青胶团的分散度, 使得沥青胶团分散, 从而增强了沥青流动性, 降低黏度。

#### 参考文献

- [ 1 ] Huang T, He H W, Zhang P, et al. Laboratory investigation on performance and mechanism of polyphosphoric acid modified bio-asphalt[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 333: 130104.
- [ 2 ] Liu J, Lv S T, Peng X H, et al. Improvements on performance of bio-asphalt modified by castor oil-based polyurethane: an efficient approach for bio-oil utilization[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 305: 124784.
- [ 3 ] Zhang X F, Zhang K, Wu C F, et al. Preparation of bio-oil and its application in asphalt modification and rejuvenation: a review of the properties, practical application and life cycle assessment[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120528.
- [ 4 ] Wang H W. Review on the research of road performance of modified bio-asphalt and its mixture[J]. *International Journal of Civil Engineering and Machinery Manufacture*, 2020, 5(3): 312-327.
- [ 5 ] Fini E H, Al-Qadi I L, You Z P, et al. Partial replacement of asphalt binder with bio-binder: characterisation and modification [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2012, 13(6): 515-522.
- [ 6 ] Mills-Beale J, You Z P, Fini E, et al. Aging influence on rheology properties of petroleum-based asphalt modified with biobinder[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, 26(2): 358-366.
- [ 7 ] Richardson D N, Lusher S M. The guayule plant: a renewable, domestic source of binder materials for flexible pavement mixtures[J]. *Nchrp Idea Program Project Final Report*, 2013, 46: 1-46.
- [ 8 ] 马峰, 李晓彤, 傅珍. 生物油改性橡胶沥青及其混合料性能研究进展[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(2): 55-62.  
Ma F, Li X T, Fu Z. Research progress in road performance of bio-modified asphalt rubber and the mixture[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(2): 55-62.(in Chinese)
- [ 9 ] 曹卫东, 张晓波, 戚新龙, 等. 生物沥青的研究进展[J]. *石油沥青*, 2014, 28(5): 1-5.  
Cao W D, Zhang X B, Qi X L, et al. Advances in bio-asphalt research[J]. *Petroleum Asphalt*, 2014, 28(5): 1-5.(in Chinese)
- [ 10 ] 张晗, 贾劲松, 佟禹, 等. 生物油对再生沥青流变性能影响的研究[J]. *市政技术*, 2022, 40(1): 70-73, 86.  
Zhang H, Jia J S, Tong Y, et al. Study on the influence of bio-oil on rheological properties of recycled asphalt[J]. *Journal of Municipal Technology*, 2022, 40(1): 70-73, 86.(in Chinese)
- [ 11 ] 唐伯明, 曹芯芯, 朱洪洲, 等. 生物油再生沥青胶结料路用性能分析[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 207-214.  
Tang B M, Cao X X, Zhu H Z, et al. Pavement properties of bio-oil rejuvenated asphalt binder[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 207-214.(in Chinese)
- [ 12 ] 雷勇. 生物油改性沥青特性及粘附性评价方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.  
Lei Y. Study on Characteristics and Adhesion Evaluation of Bio - oil Modified Asphalt[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese)
- [ 13 ] 高新文, 刘朝晖. 生物油再生沥青自愈机理分析[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(4): 235-242.  
Gao X W, Liu Z H. Self-healing mechanism of bio-oil recycled asphalt[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(4): 235-242.(in Chinese)
- [ 14 ] 张佳运, 郭易木, 童天志, 等. 生物柴油残渣对老化沥青物理性能的影响[J]. *石油沥青*, 2014, 28(4): 11-15.  
Zhang J Y, Guo Y M, Tong T Z, et al. Effect of biodiesel residue on physical properties of aging asphalt[J]. *Petroleum Asphalt*, 2014, 28(4): 11-15.(in Chinese)
- [ 15 ] 孙朝杰. 废旧油脂类生物沥青路用性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
Sun C J. Study on road performance of waste oily bioasphalt[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [ 16 ] Cooper S, Mohammad L, Elseifi M. Evaluation of asphalt mixtures containing renewable binder technologies[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2013, 6: 570-575.
- [ 17 ] Hajj E Y, Souliman M I, Alavi M Z, et al. Influence of hydrogreen bioasphalt on viscoelastic properties of reclaimed asphalt mixtures[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2013, 2371(1): 13-22.
- [ 18 ] 李开达, 张涛, 平西建, 等. 基于组合赋权及TOPSIS的隐写分析算法综合评估[J]. *应用科学学报*, 2012, 30(4): 335-342.  
Li K D, Zhang T, Ping X J, et al. Comprehensive performance evaluation of steganalysis based on combination weight and TOPSIS[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2012, 30(4): 335-342.(in Chinese)
- [ 19 ] 李宁利, 王猛, 赵新坡, 等. 废轮胎胶粉-废塑料复合改性沥青改性机理[J]. *塑料*, 2020, 49(3): 17-20.  
Li N L, Wang M, Zhao X P, et al. Modification mechanism of waste tire rubber powder and waste plastic compound modified asphalt[J]. *Plastics*, 2020, 49(3): 17-20.(in Chinese)
- [ 20 ] 张冉. 温拌一再生沥青胶结料再生机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Zhang R. Mechanism study on warm mix recycled - hot mix recycled asphalt binders[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.(in Chinese)