

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.035

# 微藻油改性沥青及混合料性能

吴靖江<sup>1</sup>,褚付克<sup>2,3,4</sup>,殷卫永<sup>2,3,4</sup>,张永<sup>5</sup>,时海霞<sup>5</sup>

(1.中建七局交通建设有限公司,河南 郑州 450000;2.交通运输行业公路建设与养护技术、材料及装备研发中心,河南 郑州 450000;3.河南省交通规划设计研究院股份有限公司,河南 郑州 450000;4.河南省固废材料道路工程循环利用重点实验室,河南 郑州 450000;5.中国建筑第七工程局有限公司,河南 郑州 450000)

**摘要:**为缓解石油沥青短缺局势,探索微藻油在改性沥青领域适用性,通过四组分分析法、三大指标试验和高温剪切流变、低温弯曲蠕变劲度试验,研究微藻油成分组成、改性沥青常规性能和高低温流变性能;通过马歇尔试验、高温车辙和低温弯曲试验研究微藻油改性沥青混合料性能。结果表明:微藻油类似凝胶型沥青结构,硬质成分含量较多;随着微藻油掺量增加,改性沥青软化点逐渐升高,延度和针入度逐渐减小。当微藻油掺量为30%时,改性沥青软化点达60℃以上,老化前后高温性能分级均为PG 70,对应混合料动稳定度达到5 000次/mm以上,低温弯曲应变高于2 500  $\mu\epsilon$ ,综合性能较好。为确保良好的高低温性能,微藻油改性沥青中微藻油掺量宜为20%~30%。

**关键词:**道路工程;微藻油改性沥青;混合料;性能

**中图分类号:**U414

**文献标志码:**A

## 0 引言

随着全球范围公路沥青路面建设与养护规模的不断增加,沥青材料需求亦不断增加。此外,沥青材料受到原油供应、战略储备、国际形势等诸多因素影响,价格持续高位运行,显著增加了公路沥青路面建设成本,不利于沥青路面建设与养护的长久持续发展。在此背景下,生物质沥青应运而生。生物质沥青主要是以植物茎秆、废食用油、牲畜排泄物、木质纤维素和微藻等可再生材料为基础,经过裂解、提取和深加工制备得到的新型沥青材料<sup>[1-2]</sup>。国内外学者对此开展了相关研究。Yang等<sup>[3]</sup>通过气相色谱-质谱、红外光谱和絮凝滴定法研究了生物油改性沥青的元素组成、化学成分、氧化老化及相容性;Gong等<sup>[4]</sup>以废食用油为原材料制备生物沥青,将其添加到经短期老化的老化沥青中制备生物油再生沥青,研究了生物油再生沥青的黏度、高温抗车辙、低温抗裂性及成分组成;汪海年等<sup>[5]</sup>基于动态剪切流变DSR和布氏黏度仪RV研究了木屑生产的生物沥青结合

料的流变性能;王飞等<sup>[6]</sup>研究了废食用油生物沥青改性沥青混合料的动态模量、流变数和疲劳性能。此外还有关于生物改性橡胶沥青流变性能<sup>[7]</sup>、桉木基生物油改性沥青力学性能<sup>[8]</sup>、纳米二氧化硅高性能生物沥青<sup>[9]</sup>以及生物沥青分别与SBS<sup>[10]</sup>、TLA复合改性沥青<sup>[11]</sup>制备及性能等相关研究,但目前这些研究主要集中在以植物茎秆、植物油为原材料的传统生物沥青性能方面。

与传统生物质原材料相比,微藻具有生长繁殖快,培养周期短、占地面积小、含脂量高等优点,是良好的生物质沥青原材料。Chailleux等<sup>[12]</sup>通过红外光谱、核磁共振和气相色谱-质谱方法分析发现,微藻凝胶在复数模量、流变性能和化学组成上具有较多类似;唐喆等<sup>[13]</sup>研究表明微藻可用于生产生物柴油、裂解油。将微藻油开发制备生物沥青及改性沥青,具有更广阔的应用前景。但目前中国针对微藻油改性沥青的研究鲜有报道,亟需开展关于微藻油改性沥青的进一步深入研究。

基于此,本文从微藻液中提取微藻油并制备微藻油改性沥青,分析微藻油改性沥青四组分组成,研

收稿日期:2023-01-25

基金项目:中建七局科技研发计划项目(编号:CSCEC7b-2019-Z-14)

作者简介:吴靖江,男,大学本科,高级工程师.E-mail:wujingjiang@csceec.com

究不同微藻油掺量下微藻油改性沥青老化前后常规性能、高温流变和低温流变性能以及微藻油改性沥青混合料马歇尔性能和路用性能,以期微藻油改性沥青的制备及性能研究提供参考。

## 1 原材料

### 1.1 基础试验材料

(1) 基质沥青。采用中海油A级AH-70<sup>#</sup>作为基质沥青,其各项指标满足相关规范要求。

(2) 微藻液。人工培养,主要藻类为菱形藻、绿金藻、小球藻等培育藻种。微藻液中活性微藻浓度不低于 $10^4 \sim 10^5$ 个/mL。

### 1.2 微藻油制备

结合生物油改性沥青制备方法、油脂提取方法、微藻油提取生物燃料方法,确定本研究用微藻油按下述步骤制备:①用强度为 $0.7 \sim 0.8 \text{ mW/cm}^2$ 紫外线照射微藻液4~6 h,使微藻细胞被充分灭活;②向微藻液中加入芽孢杆菌,使芽孢杆菌浓度达到 $10^6 \sim 10^7 \text{ cfu/mL}$ ,在室温条件下放置20~24 h,失去活性的微藻细胞被细菌充分降解为水溶性蛋白质和细胞壁等成分,得到微藻悬浊液;③将微藻悬浊液加入离心过滤机,配合蛋白质滤膜,将微藻悬浊液中的水溶性蛋白质离心分离,得到微藻残渣;④将微藻残渣置于 $110 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱中烘干2~3 h,直到水分完全挥发,得到干燥微藻残渣;⑤将正己烷加入到干燥微藻残渣中,充分搅拌30~60 min,静置15~20 h,将溶液中的不溶物充分过滤掉,得到微藻油的正己烷溶液;⑥将上述含有微藻油的正己烷溶液在 $70 \sim 80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热蒸馏、萃取,使正己烷充分挥发,得到微藻油成品。

### 1.3 微藻油改性沥青制备

将基质沥青和微藻油均加热到 $140 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,将设定剂量的微藻油缓慢加入到基质沥青中,然后在 $150 \sim 160 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下以 $500 \sim 1\,000 \text{ r/min}$ 低速搅拌10~15 min,然后以 $3\,500 \sim 4\,000 \text{ r/min}$ 高速剪切搅拌20~30 min,得到微藻油改性沥青成品。

## 2 微藻油改性沥青性能

### 2.1 微藻油四组分分析

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》

(JTGE20—2011)T01618试验方法,采用四组分方法分析微藻油中各成分。试验结果如表1所示。

表1 沥青组分分析试验结果

沥青种类	饱和分/%	芳香分/%	沥青质/%	胶质/%
普通AH-70 <sup>#</sup> 沥青	27.6	38.3	13.2	20.9
微藻油	17.7	20.3	32.6	29.4

由表1可知:微藻油中沥青质含量约为普通AH-70<sup>#</sup>沥青的2.5倍,胶质含量约为普通AH-70<sup>#</sup>沥青的1.4倍。微藻油中沥青质和胶质总量达60%以上,约为对应普通AH-70<sup>#</sup>沥青的1.8倍,表明微藻油中硬质成分含量较多,类似凝胶型沥青结构。

### 2.2 微藻油改性沥青常规性能

按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)相关试验方法,测试不同微藻油掺量下的微藻油改性沥青老化前后针入度、延度和软化点等指标,其中微藻油改性沥青老化试验采用试验规程中TFOT薄膜烘箱老化方法,老化温度 $163 \text{ }^\circ\text{C}$ ,老化时间300 min。微藻油掺量均以基质沥青掺量为基准,掺量分别为0%、10%、20%、30%、40%。试验结果如图1所示。

由图1(a)可知:随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青老化前后针入度均逐渐减小,老化前针入度降低幅度较大,老化后降低幅度较缓。老化前微藻油掺量为30%时,针入度为5.1 mm,微藻油掺量为40%时,针入度已降低到4 mm以下。老化前后针入度差值随着微藻油掺量增加逐渐减小,老化后残留针入度比逐渐增加。即随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青的耐老化作用增强。

分析图1(b)可知:随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青老化前后 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 延度均逐渐减小,老化前延度降低幅度较大,老化后降低幅度较缓。老化前微藻油掺量为30%时, $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 延度为106 cm, $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 延度为25 cm;当微藻油掺量为40%时, $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 延度降低至100 cm以下, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 延度降低至20 cm以下。老化前后延度差值随着微藻油掺量增加逐渐减小,即随着微藻油掺量增加,老化后 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 延度降低幅度减小,微藻油改性沥青的耐老化作用增强。

分析图1(c)可知:随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青老化前后软化点均逐渐增加,老化前增加幅度大于老化后。当微藻油掺量为30%时,老化前

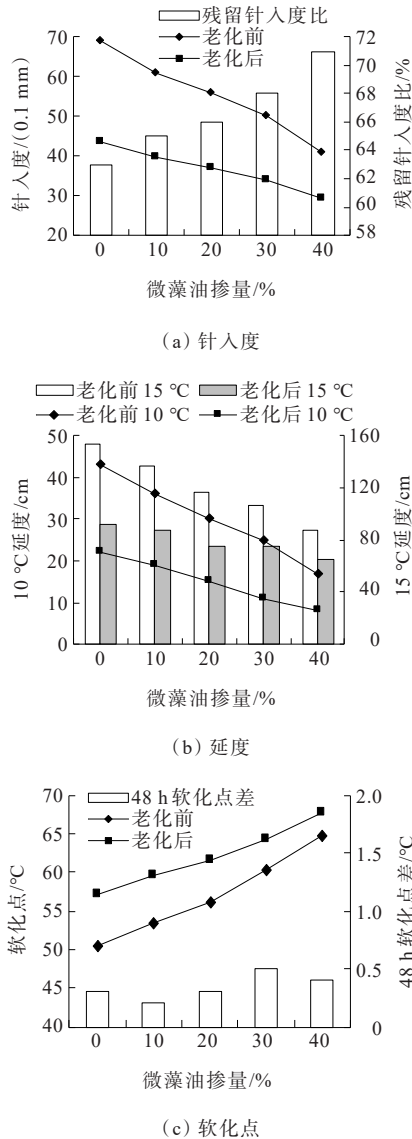


图1 不同微藻油掺量下微藻油改性沥青常规性能指标

软化点达  $60.4^{\circ}\text{C}$ 。老化后软化点增加,但增加幅度逐渐减小,即微藻油掺量增加时,老化作用对微藻油改性沥青的影响降低。48 h 软化点差均小于  $0.5^{\circ}\text{C}$ ,且随着微藻油掺量增加,变化趋势并无明显规律,可认为 48 h 软化点差由试验误差引起,即微藻油改性沥青不存在离析等不均匀现象,微藻油与基质沥青相容性良好,通过高速剪切搅拌即可制备性能稳定均匀的微藻油改性沥青。

掺加不同掺量的微藻油后,微藻油改性沥青性能呈现上述变化规律,主要是由微藻油中各沥青成分决定。与基质沥青相比,微藻油中沥青质和胶质硬质组分含量较多,芳香分和饱和分等轻质组分含量较少。沥青中硬质组分越多,软化点越高,延度和针入度越小;轻质组分越多,软化点越低,延度和针

入度越高。掺入微藻油后,微藻油改性沥青相对于基质沥青,硬质组分增加,轻质组分减小。微藻油掺量越大,微藻油改性沥青相对于基质沥青组分变化越显著,这种组分变化引起微藻油改性沥青三大指标变化,且变化幅度随着微藻油掺量增加而增大。沥青短期老化过程中,芳香分发生缩聚反应转化为胶质,芳香分含量越高,老化后性能变化越显著。随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青中芳香分含量降低,老化过程中组分转化相对基质沥青较小,老化后三大指标变化幅度减小,即微藻油改性沥青耐老化性能提升。

## 2.3 微藻油改性沥青流变性能

### 2.3.1 高温流变

微藻油高温流变性能采用 DSR 试验,试验仪器为 MCR301 型动态剪切流变仪,转动轴直径 25 mm,频率 10 rad/s,采用  $52^{\circ}\text{C}$ 、 $58^{\circ}\text{C}$ 、 $64^{\circ}\text{C}$ 、 $70^{\circ}\text{C}$ 、 $76^{\circ}\text{C}$  5 个试验温度,在不同微藻油掺量下,对未老化及经过 TFOT 薄膜烘箱老化后微藻油改性沥青进行动态剪切流变试验,得到不同改性沥青的复数模量  $G^*$  和相位角  $\delta$ ,据此计算沥青的车辙因子  $G^*/\sin\delta$ ,评价其高温流变性能。试验结果如图 2 所示。

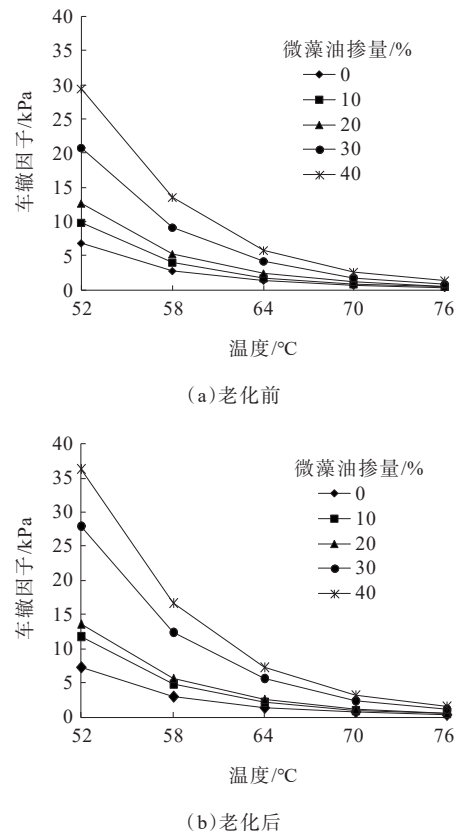


图2 不同微藻油掺量下的微藻油改性沥青高温流变性能

由图2可知:不同掺量的微藻油改性沥青动态剪切试验车辙因子随着试验温度的升高逐渐降低,老化后车辙因子均高于老化前。Superpave规范将老化前沥青车辙因子为1.1 kPa时对应的试验温度作为沥青失效温度,将老化后车辙因子为2.2 kPa时对应的试验温度作为沥青失效温度,并根据失效温度确定沥青性能分级。根据图2中试验结果,采用插值法确定老化前后对应的失效温度。当微藻油掺量分别为0%、10%、20%、30%、40%时,老化前对应的失效温度分别为65.4℃、68.0℃、69.9℃、74.4℃、76.7℃,对应的性能分级分别为PG 64、PG 64、PG 64、PG 70、PG 76;老化后对应的失效温度分别为60.7℃、63.9℃、65.7℃、70.9℃、73.7℃,对应的性能分级分别为PG 58、PG 58、PG 64、PG 70、PG 70。老化前后失效温度降低值分别为4.7℃、4.1℃、4.2℃、3.5℃、3.0℃。老化前后不同微藻油掺量改性沥青车辙因子失效温度试验结果表明,微藻油可显著提高沥青高温性能,且可改善沥青耐老化性能。当微藻油掺量为30%时,微藻油改性沥青老化前后性能分级均已达到PG 70,具有较好的耐高温性能。

### 2.3.2 低温流变

参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)中T0627沥青弯曲蠕变劲度试验,采用弯曲梁流变仪测试微藻油改性沥青低温流变性能,试验仪器为美国CANNON TE-BBR低温弯曲梁流变仪,试验温度为-6℃和-12℃,在不同微藻油掺量下,对未老化及经过TFOT薄膜烘箱老化后微藻油改性沥青进行低温弯曲流变试验,得到弯曲蠕变劲度模量 $S$ 和蠕变速率 $m$ ,其中蠕变劲度模量可反映不同类型沥青的抗永久变形能力,在一定范围内,沥青蠕变劲度模量越大,表明沥青低温下越容易脆裂,脆性越强,低温抗裂性能越差。蠕变速率 $m$ 表示劲度模量对荷载作用时间的曲线斜率,即蠕变曲线斜率,蠕变速率越大,表明沥青蠕变劲度模量随时间变化越灵敏,低温条件下,沥青劲度模量可快速降低,避免或缓解沥青混合料低温开裂破坏<sup>[14-15]</sup>。沥青蠕变劲度模量越小,蠕变速率越高,沥青低温抗裂性能越好,根据这两个指标可综合评价不同沥青的低温抗裂性能。老化前后,不同微藻油掺量下的微藻油改性沥青低温流变试验结果如图3所示。

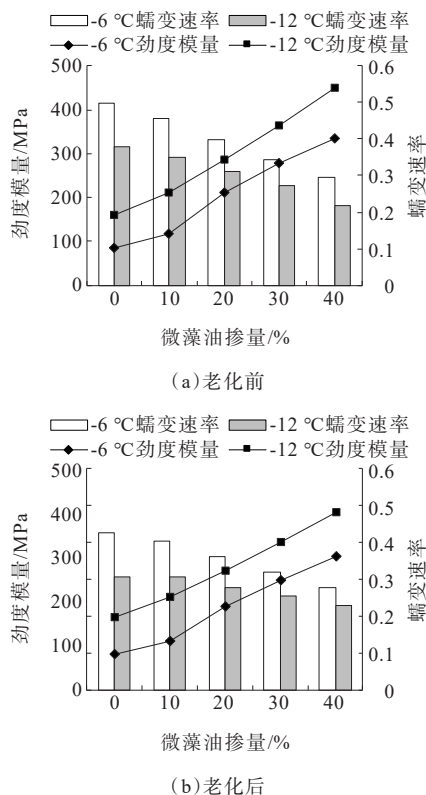


图3 不同微藻油掺量下的微藻油改性沥青低温蠕变性能

由图3可知:相同温度下,随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青劲度模量逐渐升高,蠕变速率逐渐降低;相同微藻油掺量下,-6℃劲度模量整体低于-12℃劲度模量,-6℃蠕变速率整体高于-12℃蠕变速率。表明微藻油掺量增加造成微藻油改性沥青低温性能降低,脆性增加。相同微藻油掺量下,温度越低,改性沥青脆性越强,越容易低温脆裂。相同微藻油掺量和试验温度下,老化后劲度模量升高,蠕变速率降低。

对比老化前后性能可知:-6℃条件下,微藻油掺量为0时,老化后劲度模量增加14%,蠕变速率减小15%;微藻油掺量为40%时,老化后劲度模量增加8%,蠕变速率减小6%;-12℃条件下,微藻油掺量为0时,老化后劲度模量增加23%,蠕变速率减小19%;微藻油掺量为40%时,老化后劲度模量增加7%,蠕变速率减小6%。相同温度下,随着微藻油掺量增加,老化后劲度模量增加幅度和蠕变速率减小幅度均呈现逐渐减小趋势,表明在基质沥青中添加微藻油有利于提高微藻油改性沥青抗老化性能。

美国SHRP沥青胶结料规范要求沥青经PAV老化后的蠕变劲度应不大于300 MPa,蠕变速率大于0.3。根据图3试验结果,-6℃条件下,微藻油掺量

为 30% 时,改性沥青老化后劲度模量为 296 MPa,蠕变速率为 0.32,满足要求;微藻油掺量为 40% 时,改性沥青老化后劲度模量为 362 MPa,蠕变速率为 0.28,不满足要求。-12℃ 条件下,微藻油掺量为 10% 时,改性沥青老化后劲度模量为 252 MPa,蠕变速率为 0.31,满足要求;当微藻油掺量继续增大时,老化后劲度模量和蠕变速率均不满足要求。因此,从低温性能考虑,当最低气温高于 -6℃ 时,微藻油最大掺量可达 30%;当最低气温低于 -6℃,高于 -12℃ 时,微藻油最高掺量宜为 10%。掺量过高,老化后低温性能不满足要求。

### 3 微藻油改性沥青混合料性能

#### 3.1 混合料马歇尔性能

参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004),采用不同微藻油掺量的微藻油改性沥青进行沥青混合料马歇尔试验,混合料级配均采用相同的 AC-13 级配,油石比均为 4.9%,击实温度均为 145℃,双面击实 75 次。不同微藻油掺量的马歇尔试验结果如表 2 所示。

表 2 微藻油改性沥青混合料马歇尔试验结果

微藻油掺量/%	空隙率/%	矿料间隙率/%	沥青饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
0	4.1	14.4	71.5	10.2	2.89
10	4.2	14.5	71.0	10.6	3.02
20	4.4	14.6	69.9	11.4	3.21
30	4.7	14.9	68.5	12.5	3.32
40	5.1	15.2	66.4	13.8	3.54
规范要求	3~5	空隙率为 4% 时, ≥14	65~75	≥8	2~4

由表 2 可知:随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青混合料空隙率和沥青饱和度逐渐减小,矿料间隙率、稳定度和流值逐渐增加。微藻油掺量由 0 增加到 40%,空隙率增加值为 1%,沥青饱和度减小值为 5.1%;稳定度增加值为 3.6 kN,增加幅度 35%;流值增加值为 0.65 mm,增加幅度为 22%。微藻油掺量变化对混合料马歇尔试验结果有较大影响。

微藻油改性沥青混合料马歇尔试验结果表现出上述规律,主要是由于微藻油掺量增加引起改性沥青中硬质组分增加,改性效果增强,改性沥青软化点升高,改性沥青混合料需要较高的击实成型温度。

在相同的击实温度下,微藻油掺量越高,微藻油改性沥青混合料击实越困难,导致混合料击实后密度减小,混合料空隙率增大。矿料间隙率和沥青饱和度受击实后混合料密度影响,表现出对应的变化规律。微藻油改性沥青混合料稳定度受到微藻油改性作用和空隙率变化的综合影响,随着微藻油掺量增加混合料稳定度逐渐增大,表明微藻油的改性作用大于空隙率增大造成的不利影响,混合料强度整体增加。流值受混合料空隙率影响较大,流值增加表明混合料变形增大。

在设定的马歇尔试验条件下,当微藻油掺量为 40% 时,空隙率偏大,不满足要求。其他性能指标均在规范范围内。为保证微藻油改性沥青混合料马歇尔试验结果满足要求,当微藻油掺量较大时,可适当提高拌和成型温度。

#### 3.2 路用性能

采用不同微藻油掺量的微藻油改性沥青,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE 20—2011)试验方法,成型不同路用性能测试混合料试件。参照 3.1 节中试验结果,当微藻油掺量小于或等于 20% 时,路用性能测试试件成型温度为 145℃,当微藻油掺量大于 20% 时,路用性能测试试件成型温度为 155℃,混合料级配和油石比等其他试验条件均相同。不同微藻油掺量的混合料路用性能试验结果如表 3 所示。

表 3 微藻油改性沥青混合料路用性能

微藻油掺量/%	车辙试验		-10℃低温弯曲试验		残留稳定度/%
	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	车辙深度/mm	弯拉强度/MPa	弯拉应变/με	
0	2 123	5.31	10.6	2 826	87.3
10	3 057	3.49	11.2	2 756	87.7
20	4 175	3.12	11.9	2 634	88.5
30	5 327	2.23	12.7	2 532	87.2
40	6 449	1.78	13.3	2 387	86.4
规范要求	≥2 800			≥2 500	

由表 3 可知:在高温性能方面,随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青混合料动稳定度逐渐增加,车辙深度逐渐减小。当微藻油掺量为 10% 时,动稳定度达到 3 057 次/mm,满足现行《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF 40—2004)中对改性沥青高温性能

的要求;当微藻油掺量为40%时,动稳定度达到6 000次/mm以上。表明微藻油可显著改善沥青混合料高温性能。

在低温性能方面,随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青混合料弯拉强度逐渐增加,弯拉应变逐渐减小。当微藻油掺量为30%时,微藻油改性沥青混合料低温性能略高于《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)中对改性沥青混合料低温性能的要求。微藻油掺量为40%时,低温弯曲应变显著低于规范要求。表明微藻油掺量过高时,对混合料低温性能不利。因此,从混合料低温性能方面考虑,微藻油掺量宜在30%以内。

不同微藻油掺量下,混合料残留稳定度均满足规范中对改性沥青混合料要求,微藻油掺量变化对改性沥青混合料水稳定性能影响不显著。

## 4 结论

(1) 微藻油可从微藻液中萃取提炼得到,类似凝胶型沥青结构,硬质成分含量较多。微藻油与普通基质沥青具有良好的相容性。随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青软化点逐渐升高,延度和针入度逐渐缩小。当微藻油掺量为30%时,微藻油改性沥青软化点达60℃以上,10℃延度达25cm。微藻油可改善沥青的耐老化性能。

(2) 微藻油掺量分别为10%、20%和30%时,微藻油改性沥青老化前高温性能分级分别为PG 64、PG 64、PG 70,老化后对应的高温性能分级为PG 58、PG 64、PG 70。高温流变指标表明微藻油可显著提高沥青高温性能,且可改善沥青耐老化性能。

(3) 相同温度下,随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青劲度模量逐渐升高,蠕变速率逐渐降低。-6℃条件微藻油掺量为30%时,-12℃条件微藻油掺量为10%时,改性沥青老化后劲度模量和蠕变速率仍满足SHRP沥青胶结料规范要求。

(4) 相同条件下,随着微藻油掺量增加,微藻油改性沥青混合料空隙率和沥青饱和度逐渐减小。微藻油可显著改善沥青混合料高温性能,当微藻油掺量为10%时,动稳定度达到3 000次/mm以上;当掺量为30%时,动稳定度达5 000次/mm以上,低温弯

曲应变略高于2 500  $\mu\epsilon$ 。微藻油掺量过高对沥青混合料低温性能不利。为确保混合料良好的高低温性能,微藻油改性沥青中微藻油掺量宜为20%~30%。

## 参考文献:

- [1] 冯学茂,白献萍,韦慧,等.不同老化模式下有机蒙脱土生物改性沥青性能[J].中外公路,2022,42(5):198-202.
- [2] 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.
- [3] YANG X, MILLS-BEALE J, YOU Z P. Chemical characterization and oxidative aging of bio-asphalt and its compatibility with petroleum asphalt[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142: 1837-1847.
- [4] 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.
- [5] 汪海年,高俊锋,赵欣,等.基于DSR和RV的生物沥青结合料流变特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 26-33.
- [6] 王飞,李晓娟, WEN Haifang, 等.基于废食用油的生物结合料共混沥青及其混合料性能研究[J].中外公路, 2015, 35(6): 264-268.
- [7] 包建业,王静.生物改性橡胶沥青流变性能研究[J].中外公路, 2018, 38(6): 250-253.
- [8] 邓林飞,朱俊材,聂思宇,等.桉木基生物油改性沥青结合料的力学性能研究[J].公路, 2019, 64(1): 202-206.
- [9] 赵晓翠,臧广远,弓家胜,等.高性能生物改性沥青的制备与路用性能研究[J].山东理工大学学报(自然科学版), 2020, 34(1): 28-32.
- [10] 高俊锋,汪海年,尤占平,等.SBS改性生物沥青结合料高温流变特性[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(2): 293-302.
- [11] 季坤,苟建伟.生物沥青与TLA复合改性沥青及混合料性能研究[J].新型建筑材料, 2020, 47(12): 168-172.
- [12] CHAILLEUX E, AUDE M, BUJOLI B, et al. Alternative binder from microalgae: algoroute project[C]//Workshop Alternative Binders for Sustainable Asphalt Pavements. France: 2012.
- [13] 唐喆,芮蕾,张颖,等.利用微藻制取生物燃料的研究进展[J].现代化工, 2009, 29(7): 12-17, 19.
- [14] 赵宝俊,赵士峰,张洪亮,等.纳米CaCO<sub>3</sub>/SBR复合改性沥青的性能与机理[J].长安大学学报(自然科学版), 2017, 37(5): 15-22.
- [15] 方滢,谢玮珺,杨建华.聚氨酯预聚物改性沥青的制备及其流变行为[J].功能材料, 2019, 50(6): 6197-6205.