

废机油再生沥青流变特性研究

黄传武¹, 王志祥², 陈富廉², 林国彬²

(1. 广东交科检测有限公司, 广州 510420; 2. 广东交科技术研发有限公司, 广州 510420)

摘要: 为探究废机油作为沥青再生剂的可行性, 本研究将沥青质量分数为 1% ~ 9% 的废机油应用于不同老化程度的沥青中, 制备再生沥青, 并通过黏度试验、高低温流变性能试验及凝胶渗透色谱试验分析废机油再生沥青的流变特性及微观分子量分布特征, 确定其最佳掺量。试验结果表明, 废机油的添加能明显降低老化沥青的黏度; 适量的废机油可以将老化沥青的黏度及高、低温流变性能恢复至其原始水平; 废机油的添加能明显改善老化沥青的大分子及小分子的分子量分布; 当废机油的掺量范围分别为 7% ~ 9% 和 5% ~ 7% 时, 老化基质沥青与老化 SBS 改性沥青的黏度、高低温流变特性及分子量分布能基本恢复至与原样沥青相一致的水平。

关键词: 老化沥青; 废机油; 流变特性; 分子量; 再生

中图分类号: U414

文献标识码: A

Study on the Rheological Characteristics of Waste Oil Recycled Asphalt

HUANG Chuanwu¹, WANGZ Zhixiang², CHEN Fulian², LIN Guobin²

(Guangdong Jiaoke Testing Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China; Guangdong Jiaoke Technology R & D Co., Ltd., Guangzhou 510420, Guangdong, China)

Abstract: In order to explore the feasibility of using waste engine oil as asphalt regeneration agent, this study applies 1% ~ 9% (weight fraction) waste engine oil to asphalt with different aging degrees to prepare recycled asphalt, and analyzes the rheological properties and microscopic molecular weight distribution characteristics of recycled asphalt from waste engine oil through viscosity test, high and low temperature rheological performance test and gel permeation chromatography test to determine its optimal dosage. The results show that the addition of waste engine oil can significantly reduce the viscosity of aged asphalt; an appropriate amount of waste oil can restore the viscosity and high and low temperature rheological properties of aged asphalt to its original level; the addition of waste engine oil can significantly improve the molecular weight distribution of large and small molecules in aged asphalt; when the dosage range of waste engine oil is 7% ~ 9% and 5% ~ 7%, the viscosity, high and low temperature rheological properties, and molecular weight distribution of aged matrix asphalt and aged SBS modified asphalt can basically return to the same level as the original asphalt.

Key words: aged asphalt; waste oil; rheological properties; molecular weight; regeneration

随着公路建设行业的快速发展和公路里程的逐年增加, 每年道路养护和改造会产生大量的废旧沥青混合料 (reclaimed asphalt pavement, RAP), 对 RAP 进行高值化高掺量回收再利用不仅具有显著的经济效益, 还能节约自然资源并减

少环境污染^[1-3]。对 RAP 进行高值化再生的关键点之一在于再生剂的使用, 目前针对各种低成本沥青再生剂 (废食用油、热解废轮胎油、废机油等) 的报道屡见不鲜, 其中废机油由于价格低廉、来源广泛, 且可起到资源再利用作用等原因

收稿日期: 2023-06-26

作者简介: 黄传武, 工程师, 本科, 研究方向为路面养护

基金项目: 广东省科技厅科技项目 (编号: 2021B1111610002); 广东省交通集团科技项目 (编号: JT2023YB11)

而引起了国内外研究者的广泛关注^[4-5]。

国内外学者对废机油再生技术进行了大量的研究工作。徐朋朋^[6]利用废机油对实验室模拟老化的沥青进行了再生研究,并测试了废机油再生试样的相关路用性能,研究发现废机油可以使老化试样的性能得到恢复,可以作为沥青再生剂。Golalipour^[7]对废机油再生沥青的高低温性能进行了测试分析,发现废机油能够很好地改善老化沥青的低温性能。崔亚楠等^[8]探究了废机油再生沥青的流变性能,发现废机油可以更有效地提高老化沥青的抗车辙性能和抗疲劳性能。Kilger 等^[9]对废机油改性沥青的长期老化性能进行了研究,得出在测试废机油改性沥青的长期老化性能时应考虑延长老化时间的结论。刘芳等^[10]探讨了老化对废机油再生沥青流变特性的影响,发现废机油再生沥青的流变及抗裂性能受老化作用的影响较原样沥青显著。李晋等^[11]对废机油再生沥青的抗老化性能进行了探究,发现再生沥青具有较好的抗老化性能,但将废机油用于再生沥青路面时,易出现过早过度破坏。Zaumanis 等^[12]探究了废机油对回收沥青性能的影响,研究发现废机油的加入会降低沥青的针入度指数和拉伸强度。然而,目前关于废机油再生沥青的研究并不全面,未能系统全面地探究废机油掺量对不同老化沥青宏观性质的影响进而评价其再生效果。

本文采用废机油对老化的基质沥青和 SBS 改性沥青进行再生,并通过黏度测试、高低温流变性能试验及凝胶渗透色谱试验分析废机油再生沥青的流变特性及微观分子量分布特征,以验证废机油对老化沥青的再生功效。研究成果有助于废机油再生沥青技术的推广运用,不仅能够实现“以废治废”的功效,而且具有显著的经济和环境效益。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

1.1.1 沥青的选用

本研究原样沥青选择 SK-70 沥青及 SBS 改性沥青。根据文献^[13],将原样沥青(记为原样)进

行短期薄膜烘箱老化试验(rotating film oven test, RTFOT),然后对老化的沥青分别进行压力老化(pressure aging vessel, PAV)、紫外老化(ultraviolet aging, UV),制备热氧老化沥青试样分别记为 PAV 老化、UV 老化。几种沥青的基本技术指标如表 1 所示。

表 1 几种沥青的基本技术指标								
技术指标	单位	SK-70 [#]			SBS 改性沥青			试验方法
		原样	PAV 老化	UV 老化	原样	PAV 老化	UV 老化	
针入度 (25℃)	0.1 mm	70.5	23.3	36.5	55.5	27.7	38.3	T-0604
软化点	℃	46.8	61.2	53.6	75.5	86.9	80.3	T-0606
延度	cm	50.8	1.6	11.2	25.5	0.9	5.5	T-0605
黏度 (135℃)	Pa·s	0.455	1.42	1.039	1.970	2.856	2.513	T-0625

注:基质沥青和改性沥青的延度测试温度分别是 10℃和 5℃。

1.1.2 再生剂的选用

本研究废机油选择壳牌废机油(记为 W),其为汽车在里程 9000~11 000 km 时第一次换下的机油,同时选择常州信拓 XT-1 再生剂(厂家建议最佳掺量为 2%~5%,本文中掺量与含量均为质量分数)作为对照组,两种材料的基本技术指标如表 2 所示。

表 2 再生剂的技术特性		
测试项目	再生剂类型	
	废机油	XT-1
外观	黑褐色	黑褐色
60℃黏度/cSt	36.8	163
15℃密度/(g/cm³)	0.696	0.98
闪点/℃	>235	>220

1.1.3 再生沥青的制备

本研究再生沥青的制备过程如图 1 所示。

1.2 试验方法

1.2.1 黏度测试

再生沥青的黏度参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中介绍的布洛克菲尔德黏度计法进行测试,选择 21#或 27#转子,温度为 135℃。

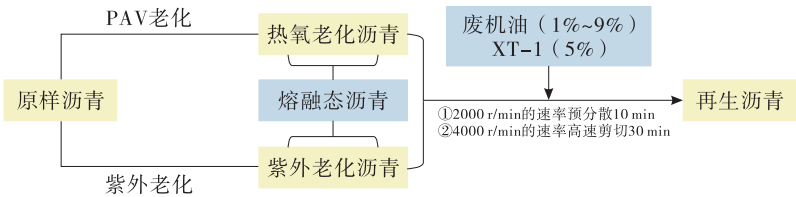


图 1 再生沥青的制备过程

1.2.2 动态剪切流变试验

再生沥青的高温流变行为测试选用奥地利 Anton Paar 公司生产的 H-PTD120 型动态剪切流变仪 (dynamic shear rheometer, DSR) 进行。对再生沥青试样分别进行温度扫描及多应力蠕变恢复试验 (multi-stress creep recovery test, MSCR), 以获得试样 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的复数模量 G^* 和相位角 δ 及 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 。其中, 温度扫描试验中, 设定应变为 12% , 角频率为 10 rad/s , 温度扫描范围为 $52\sim 88\text{ }^{\circ}\text{C}$; MSCR 试验中, 设定温度为 $64\text{ }^{\circ}\text{C}$, 应力分别为 0.1 kPa 和 3.2 kPa 。上述所有测试均按照 JTG E20—2011 和 AASHTO 规范进行。

1.2.3 弯曲梁流变试验

采用沥青弯曲蠕变劲度试验 (bending beam rheometer, BBR) 来评价沥青结合料的低温性能, BBR 试验通过测试低温环境下的试件在承受 $980\text{ mN} \pm 50\text{ mN}$ 的恒定荷载时的梁中点变形值, 通过计算得到蠕变速率 m 以及蠕变劲度 S 。 m 值越大表明沥青抗低温开裂性能越好, 而 S 表征沥青结合料的劲度模数, S 越高则柔性越差。

1.2.4 凝胶渗透色谱试验

凝胶渗透色谱 (gel permeation chromatography, GPC) 不仅可用于小分子物质的分离和鉴定, 而且可以用来分析化学性质相同分子体积不同的高分子同系物, 是一种快速且简单的分离分析技术^[14]。在道路材料领域, 可以用于分离测定高聚物的相对分子质量及其分布, 而高分子材料的相对分子质量在很大程度上会影响其表现性能。

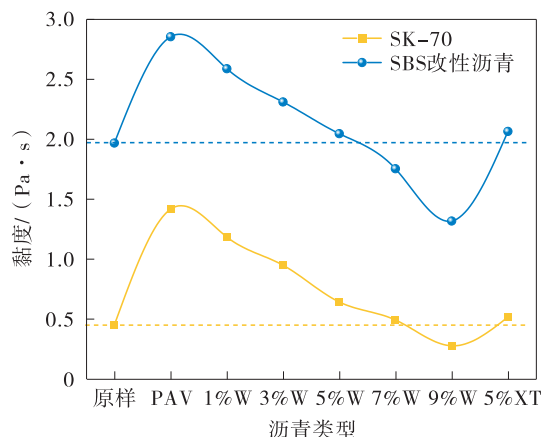
2 结果与讨论

2.1 废机油再生沥青的流变特性分析

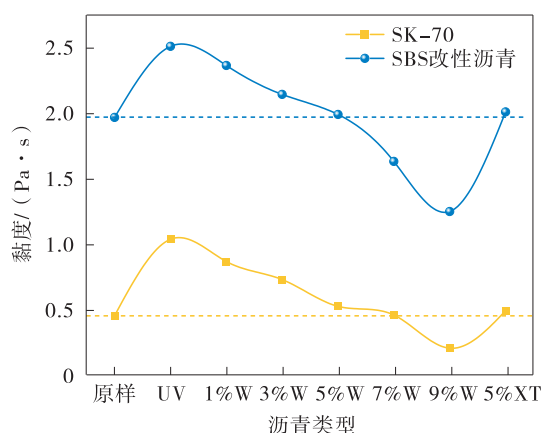
2.1.1 旋转黏度分析

沥青在老化之后其组分及胶体结构均会发生变化, 进而使得沥青的黏度发生改变。为了探究废机油对不同老化沥青的再生效果, 对不同老化沥青在老化及再生前后的黏度进行测试, 测试结果如图2所示。

由图2可知, 沥青在老化之后其黏度显著增加, 且热氧老化沥青的黏度普遍高于紫外老化沥青的黏度, 说明热氧老化对沥青黏度的影响比紫外老化要显著。废机油的添加对老化沥青的黏度具有显著恢复作用, 且再生沥青的黏度随废机油掺量的增加呈逐渐减小的趋势, 这说明废机油对



(a) 热氧老化后再生沥青的黏度



(b) 紫外老化后再生沥青的黏度

图2 废机油再生沥青的黏度随其掺量的变化

老化沥青具有良好的再生效果。对于老化的 SBS 改性沥青, 当废机油的掺量位于 5% 附近时, 其再生沥青的黏度值与原样沥青的基本一致。而对于老化的 SK-70 沥青, 当废机油的掺量位于 7% 附近时, 其再生沥青的黏度基本上能恢复至与原样沥青相一致的水平。此外, 废机油对老化沥青黏度的恢复效果与市售再生剂基本类似。

2.1.2 高温流变参数分析

为了分析废机油对老化沥青流变特性的影响, 对不同再生沥青进行温度扫描试验, 以分析废机油的掺量对不同老化沥青 G^* 和 δ ($60\text{ }^{\circ}\text{C}$) 的影响, 具体测试结果如图3所示。

由图3可知, 沥青在老化之后其 G^* 明显增加而 δ 显著下降, 即老化之后沥青的高温性能增强, 这主要是由于老化会促使沥青中的组分发生转化, 导致弹性成分增加而黏性成分下降, 进而使得沥青的高温抗变形能力增强。添加废机油之后, 老化沥青的 G^* 显著下降而 δ 明显上升, 说明废机油能够显著调节老化沥青的高温流变性能, 具有良好的再生恢复效果, 这主要是由于废

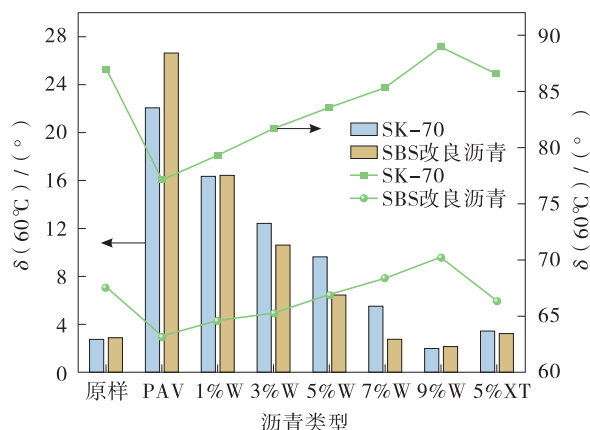
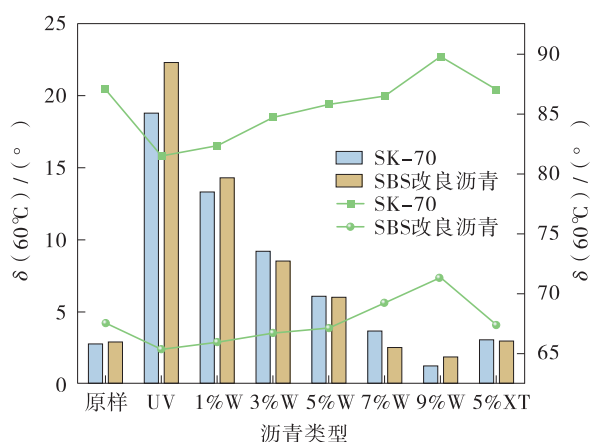
(a) 热氧老化后再生沥青的 G^* 和 δ (b) 紫外老化后再生沥青的 G^* 和 δ

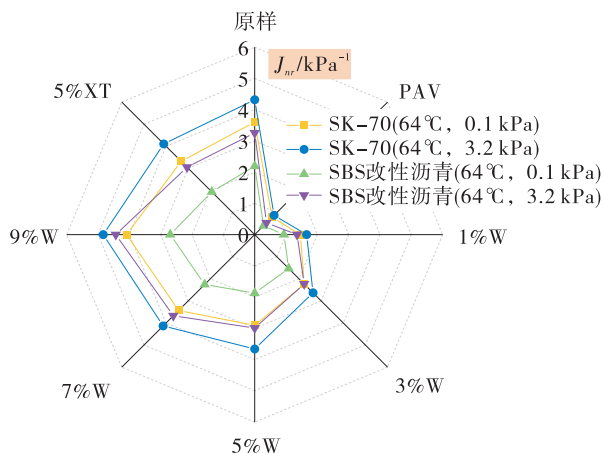
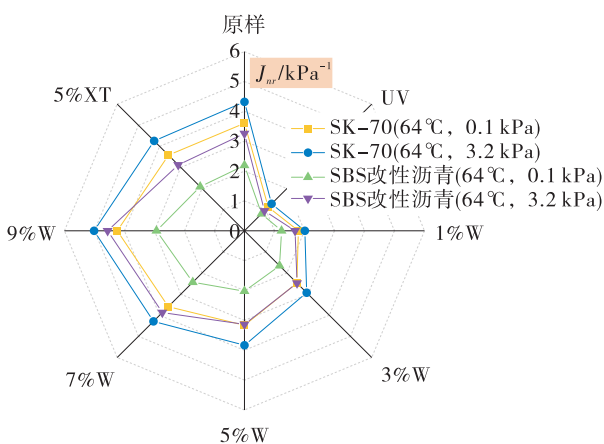
图3 废机油再生沥青的高温流变参数随其掺量的变化

机油能够调节老化沥青的组分分布, 弥补其所缺失的芳香族组分, 从而使得沥青的重质组分减少并逐步恢复其流变性能。当废机油的掺量为5%~7%时, 老化SBS改性沥青的 G^* 和 δ 均能恢复至与原样沥青相近的水平, 而使得老化SK-70沥青的高温流变参数完全恢复所需的废机油掺量为7%~9%。此外, 热氧老化和紫外老化对老化沥青高温流变性能的影响类似, 废机油对此两种老化形式下沥青的改善效果也类似。

2.1.3 不可恢复蠕变柔量分析

不可恢复蠕变柔量 J_{nr} 可以表征沥青材料的抗永久变形能力, 其值越小, 沥青材料的高温抗变形性能就越好。为了探究废机油对老化沥青高温流变特性的影响, 对不同废机油再生沥青进行MSCR试验, 测试结果如图4所示。

由图4可知, 沥青在老化之后其 J_{nr} 明显下降, 这主要是因为老化使得沥青中的弹性成分增加, 导致其抗永久变形能力增强。添加废机油后, 老化沥青不同应力水平下的 J_{nr} 值均明显增加

(a) 热氧老化后再生沥青的 J_{nr} (b) 紫外老化后再生沥青的 J_{nr} 图4 废机油再生沥青的 J_{nr} 指标随其掺量的变化

且其值随着废机油掺量的增加而逐渐增大, 说明废机油能够有效调节老化沥青的高温抗变形能力, 具有较好的再生恢复效果。同时对于不同老化形式的沥青, 废机油对其 J_{nr} 及高温抗变形性能的调节效果是类似的。当废机油的掺量分别为7%~9%和5%~7%时, 老化的SK-70沥青及SBS改性沥青的高温抗变形性能均能恢复至原样沥青的水平。此外, 在最佳再生剂掺量下, 与市售再生剂XT-1相比, 废机油的再生效果更优。

2.1.4 低温蠕变参数分析

BBR试验获得的低温蠕变参数 m 和 S 能够很好地表征沥青的低温抗裂性能, 为了探究废机油对老化沥青低温流变特性的影响并评价其再生功效, 本节对不同再生沥青分别进行了BBR试验, 测试结果如图5所示。

由图5可以看出, 不论是基质沥青还是改性沥青, 其在老化之后的 m 显著下降而 S 明显上升, 说明老化会显著降低沥青的低温抗裂性能。添加废机油后, 老化沥青的 m 值明显上升而 S 显

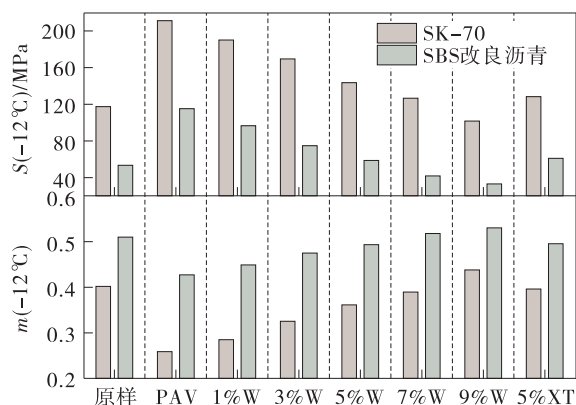
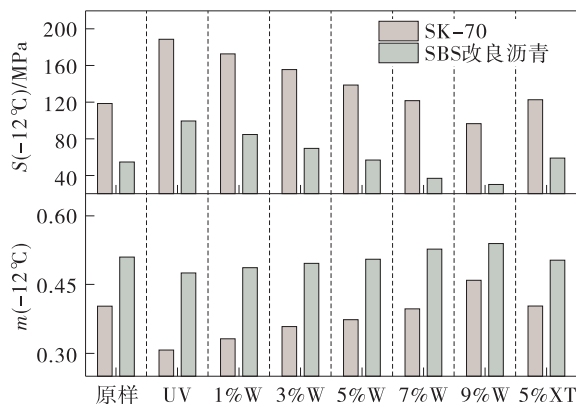
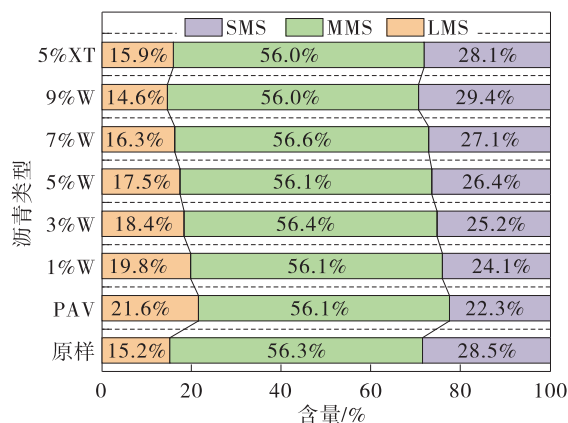
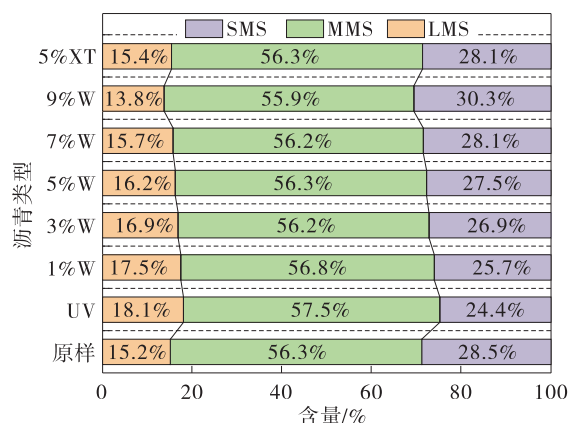
(a) 热氧老化后再生沥青的 m 和 S (b) 紫外老化后再生沥青的 m 和 S

图5 废机油再生沥青的低温蠕变参数随其掺量的变化

著下降,说明废机油能够显著改善老化沥青的低温抗裂性能,具有良好的再生效果,且老化沥青的低温性能随着废机油掺量的增加逐渐增强。当废机油的掺量位于5%附近时,老化SBS改性沥青的低温性能能够基本恢复至原来水平,而当废机油的掺量约为7%时,老化SK-70沥青的低温性能能够实现完全恢复。与市售再生剂相比,废机油对老化沥青低温性能的恢复效果明显更好。

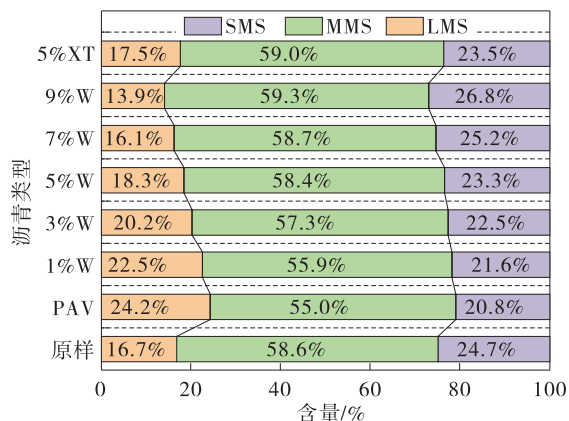


(a) 热氧老化后再生沥青的分子量分布

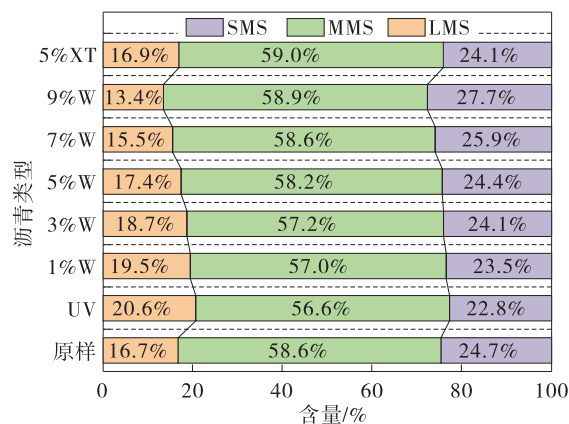


(b) 紫外老化后再生沥青的分子量分布

图6 废机油再生SK-70沥青的分子量分布随其掺量的变化



(a) 热氧老化后再生沥青的分子量分布



(b) 紫外老化后再生沥青的分子量分布

图7 废机油再生SBS改性沥青的分子量分布随其掺量的变化

2.2 废机油再生沥青的分子量分布特征

对不同沥青的GPC谱图进行处理,将其成分划分为大尺寸分子(LMS)、中尺寸分子(MMS)及小尺寸分子(SMS),图6、图7为不同废机油再生沥青的分子量分布情况。

由图6、图7可知,沥青老化后LMS含量增加而SMS含量降低,将废机油加入老化沥青后,降低了老化沥青的LMS含量而提高了其SMS含量,说明沥青在老化之后低温性能变差是由大分子含量增多引起的,而废机油的添加能明显改善老化沥青的分子量分布,使沥青中的大中小尺寸分子含量恢复平衡,从而改善老化沥青的性能,具有良好的再生功效。由图6可知,当废机油掺量为7%~9%时,热氧和紫外老化SK-70沥青的分子量分布均能恢复至与原样沥青基本一致的水平,说明废机油对老化基质沥青具有良好的再生效果。由图7可看出,当废机油掺量为5%~7%时,老化SBS改性沥青的分子量分布基本恢复。与市售再生剂XT-1相比,废机油在最佳掺量下对老化沥青分子量的再生恢复效果更好。

结论

(1) 废机油对老化沥青黏度、高温流变参数、不可恢复蠕变柔量及低温蠕变参数变化影响显著;废机油的添加能明显提升老化沥青的低温流变特性,适量的废机油能将老化沥青的高、低温流变特性恢复至原样沥青的水平。

(2) 废机油的添加能明显改善老化沥青的微观分子量分布,使沥青中的大中小尺寸分子含量恢复平衡,从而改善老化沥青的性能;与市售再生剂XT-1相比,废机油的再生效果更优。

(3) 当废机油的掺量范围分别为7%~9%、5%~7%时,老化基质沥青与老化SBS改性沥青的流变特性及微观分子量分布能基本恢复至原水平。

参考文献:

- [1] 马涛,栾英成,何亮,等. 乳化沥青与泡沫沥青冷再生技术发展综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 1-23.
- [2] 汪海年,徐宁,陈玉,等. 生物油再生老化沥青材料研究进展[J]. 中国公路学报, 2023, 36(5): 1-20.
- [3] 陈宇亮,黄毅,彭孝南,等. 就地热再生沥青路面建设期能耗与碳排放分析[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(4): 30-39.
- [4] CHEN A, HU Z, Li M, et al. Investigation on the mechanism and performance of asphalt and its mixture regenerated by waste engine oil [J]. Construction and Building Materials, 2021, 313: 125411.
- [5] LIU Z, LI S, WANG Y. Characteristics of asphalt modified by waste engine oil / polyphosphoric acid: Conventional, high-temperature rheological, and mechanism properties [J]. Journal of cleaner production, 2022: 330.
- [6] 徐朋朋. 废机油再生沥青及其混合料性能的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- [7] GOLALIPOUR A. Investigation of the Effect of Oil Modification on Critical Characteristics of Asphalt Binders [D]. Madison: University of Wisconsin-Madison, 2013.
- [8] 崔亚楠,杜春晓,郭立典. 废机油再生沥青的流变性研究[J]. 功能材料, 2022, 53(10): 10116-10121, 10129.
- [9] KILGER A, SWIERTZ D, BAHIA H U, et al. Long-Term Aging Performance Analysis of Oil Modified Asphalt Binders [J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(12): 404-412.
- [10] 刘芳,王旗,张脩,等. 老化对废机油再生沥青流变特性的影响及机理[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 95-100.
- [11] 李晋,于淼章,崔新壮,等. 废机油残留物再生沥青的抗老化性能[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 224-230.
- [12] 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.
- [13] FANG Y, ZHANG Z Q, et al. Composition Design of Waste Vegetable Oil - Based Rejuvenator Based on RSM and Performance Evaluation of Rejuvenated Asphalt [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(7).
- [14] 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.