

左云,赵晓文,颜可珍,等. ERA/WCO 复合改性沥青及沥青混合料高低温性能[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):49-56. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.007

ZUO Y, ZHAO X W, YAN K Z, et al. On High and Low-temperature Performance of European Rock Asphalt and Waste Cooking Oil Compound Modified Asphalt[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(4):49-56. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.007

ERA/WCO 复合改性沥青及 沥青混合料高低温性能

左云^{1*}, 赵晓文¹, 颜可珍², 张曼²

(1.湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙 410219;2.湖南大学 土木工程学院,湖南长沙 410008)

摘要:为探索欧洲岩沥青(European Rock Asphalt, ERA)和废食用油(Waste Cooking Oil, WCO)对沥青及沥青混合料性能的影响,应用黏度和 DSR 试验研究改性沥青的高温性能,应用 BBR 试验探索沥青在低温状态下的性能表现.此外,进行了马歇尔试验、车辙试验以及低温劈裂试验以评估改性剂对沥青混合料路用性能的影响.试验结果表明:ERA 可显著地提升沥青的车辙因子,WCO 可提升沥青的低温蠕变速率,表明 ERA 有利于沥青的高温性能,WCO 可有效改善沥青在低温条件下的应力消散能力.此外,WCO 还有助于提升沥青的抗疲劳性能.沥青混合料试验和沥青试验所得结论具有一致性,掺入 ERA 后,沥青混合料的马歇尔稳定度和动稳定度都显著提高,随着 WCO 的掺入,低温劈裂强度有所提升,表明沥青混合料的高温性能和低温性能都得到了提升.综上,为使沥青和沥青混合料均衡高温和低温两方面的优越性能,建议 ERA/WCO 复合改性沥青的最佳掺量为 18%ERA+4%WCO.

关键词:欧洲岩沥青;废食用油;沥青和沥青混合料;高温性能;低温抗裂性

中图分类号:U418.217

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2022)04-0049-08

On High and Low-temperature Performance of European Rock Asphalt and Waste Cooking Oil Compound Modified Asphalt

ZUO Yun¹, ZHAO Xiaowen¹, YAN Kezhen², ZHANG Man²

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410219, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410008, China)

Abstract: This paper mainly explores the influence of European Rock Asphalt (ERA) and Waste Cooking Oil (WCO) on asphalt and asphalt mixture performance. Viscosity and DSR tests are used to study the high-temperature performance of modified asphalt, and BBR tests are used to explore the performance of asphalt at low temperatures. In addition, Marshall test, rutting test and low-temperature splitting test are used to evaluate the impact of modifiers on the road performance of asphalt mixtures. The test results show that ERA can significantly improve the rutting factor of asphalt, and WCO could improve creep rate at low temperature, demonstrated that ERA beneficial to the high-temperature properties, and WCO can effectively improve the stress dissipation ability of asphalt under low temperature conditions. In addition, WCO is also beneficial to improve the fatigue resistance

收稿日期:2021-08-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(751201235);湖南省交通科技项目资助(201706;201902)

*通信作者,E-mail: zuoy2005@126.com

of asphalt. The conclusions of the asphalt mixture test and the asphalt test are consistent. After adding ERA, the Marshall stability and dynamic stability of the asphalt mixture is significantly improved. With the incorporation of WCO, the low-temperature splitting strength is improved, indicating that the high and low-temperature performance of asphalt mixture have been improved. In summary, in order to balance the superior performance of asphalt and asphalt mixture in terms of high temperature and low temperature, it is recommended that the optimal content of ERA/WCO composite modified asphalt is 18%ERA+4%WCO.

Keywords: European rock asphalt; waste cooking oil; asphalt and asphalt mixture; high - temperature performance; low-temperature cracking performance

沥青路面具有噪音低、维护方便以及施工快捷等优点,我国大部分的高等级道路均采用沥青路面^[1-3].经济的飞速发展伴随着交通运输的发展,不断增大的车流量和轴载对沥青路面提出了更高的要求^[4-5].研究人员^[6-7]应用废弃材料对沥青进行改性,结果表明沥青改性不仅可以提升沥青和沥青混合料的性能,还可以解决部分废弃物污染环境的问题,符合可持续发展的时代理念.

废食用油(Waste Cooking Oil, WCO)是一种食物烹饪后的无法继续使用的废弃食用油^[8-9].在中国每年会产生数百万吨的WCO,如何正确、合理以及安全地处理这些WCO是近些年研究人员关注的热点^[10-12].WCO中主要含有多环芳烃等轻质组分,且具有分子量低、黏度低等特点.研究人员应用WCO对沥青进行改性,发现WCO可以提高沥青的柔韧性、降低沥青的玻璃态转化温度^[4,13].然而,WCO改性沥青在高温下的抗永久变形能力较差,限制了WCO在沥青道路领域的应用.因此,探寻一种提升WCO改性沥青高温性能的方法是扩展废食用油应用的关键.欧洲岩沥青(European Rock Asphalt, ERA)是一种性质稳定、耐久性较强的沥青且与石油沥青有较好的相容性^[14].ERA具有含氮量高、抗氧化能力强、生物毒性低等特点,与石油沥青相容后可提升沥青的抗车辙性能^[15-16].此外,ERA在显著改善沥青高温性能的同时,ERA改性沥青在低温状态下同样具有较强的刚度,表现出较差的低温抗裂性能^[16].因此,应用ERA对WCO改性沥青进行复合改性具有一定的理论基础,有助于扩展WCO在道路工程领域的应用,这不仅有利于进一步提升沥青的性能,还具有环境保护的重要意义.

国内已有文献[9]对ERA/WCO复合改性沥青结合料的性能进行了研究,但目前尚缺乏对ERA/WCO复合改性沥青混合料的路用性能研究.因此,本文应用ERA和WCO这2种材料对沥青进行改性,探索2种改性剂对沥青及其混合料高温性能的影响.试验研究包含沥青和沥青混合料.应用布氏旋转黏度仪和动态剪切流变仪(Dynamic Shear Rheometer, DSR)评价沥青的高温性能,应用弯曲梁流变仪(Bending Beam Rheometer, BBR)评价沥青的低温抗裂性能.对于沥青混合料,采用马歇尔试验和车辙试验以评价沥青混合料的高温抗车辙性能,并应用间接拉伸试验获取低温劈裂强度以评价沥青混合料低温抗裂性能.

1 试验材料及方法

1.1 原材料

采用70号石油沥青作为基质沥青,技术指标如表1所示.改性剂为ERA和WCO,ERA的粒径为0.25 mm,软化点为177 °C,15 °C条件下的密度为1.7 g/cm³;WCO为经过滤、沉淀等除杂工序后的大豆油,呈黑褐色,15 °C条件下的密度为0.925 g/cm³,沥青改性剂的外观形态如图1所示,其具体技术参数如表2和表3所示.在制备沥青混合料阶段,所采用的粗、细集料均为道路工程领域常用的石灰岩.

表1 70号石油沥青的基本参数

技术指标	针入度(25 °C)/0.1 mm	软化点/°C	延度(15 °C)/cm	黏度(135 °C)/(Pa·s)
试验结果	69	47.3	>150	0.58
规范要求	60~80	≥46	≥100	—

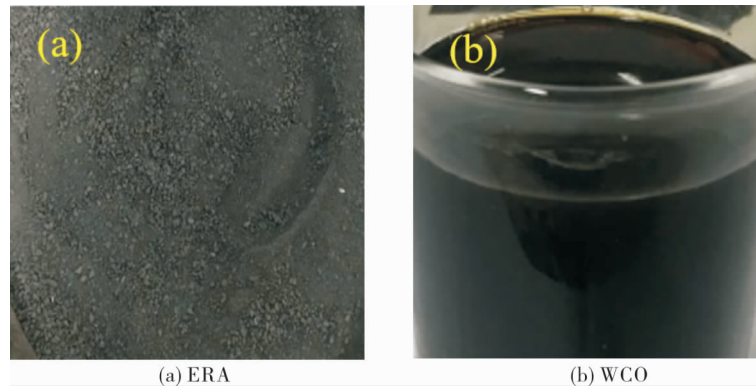


图1 沥青改性剂外观形态

表2 ERA基本技术指标

技术指标	单位	试验结果
溶解度(三氯乙烯)	%	80.2
灰分	%	9.6
含水率	%	0.42
密度(15℃)	g/cm ³	1.7

表3 WCO基本技术指标

技术指标	单位	试验结果
外观	—	深紫红色
密度	g/cm ³	0.925
黏度	Pa·s	0.178
质量变化(TFOT后)	%	0.5

1.2 试验方法

研究ERA和WCO这2种改性剂对沥青及沥青混合料高低温性能的影响.ERA的掺量(与基质沥青质量的比值)分别为6%,12%,18%,24%,WCO的掺量(与基质沥青质量的比值)分别为0%,2%,4%,6%.沥青试验应用布氏旋转黏度仪和动态剪切流变仪得到黏度、车辙因子和疲劳因子等指标以评价沥青的高温性能和抗疲劳性能.此外,低温弯曲梁流变仪用于评价沥青在低温条件下的抗裂性能.沥青混合料试验采用马歇尔稳定度和动稳定度指标来表征沥青混合料的高温抗车辙性能,并应用间接拉伸试验获取低温劈裂强度来评价沥青混合料的低温抗裂性能.

2 试样制备

2.1 改性沥青制备

首先,将基质沥青在160℃的油浴容器中加热30 min,使其充分熔融并转变为流动状态.之后,在基质沥青中掺入WCO,在1500 r/min的条件下普通旋转搅拌10 min后加入欧洲岩沥青,然后将混合物放入(155±5)℃的恒温箱内保温发育30 min.发育完成后,应用高速剪切机在160℃,3000 r/min的条件下进行高速剪切30 min.最后,在1500 r/min的条件下普通旋转搅拌10 min,以去除改性沥青中残余的气泡.

2.2 改性沥青混合料制备

以AC-13C型沥青混合料作为试验对象,合成级配曲线如图2所示.规范要求沥青混合料压实后的空隙率为4%~6%,根据马歇尔试验最终确定各类型的沥青混合料的油石比均为5.0%.

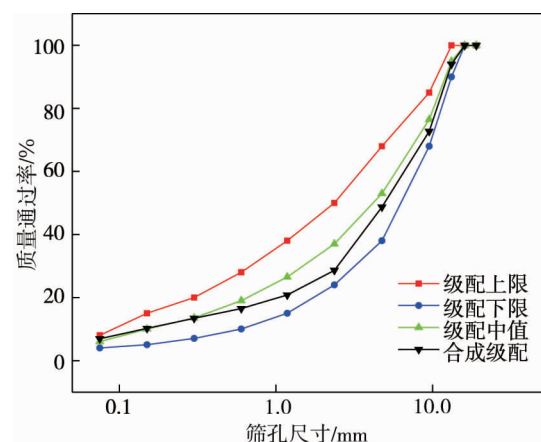


图2 集料合成级配曲线

3 ERA/WCO改性沥青流变性能研究

3.1 ERA/WCO改性沥青高温流变性能

应用布氏旋转黏度仪和DSR评价沥青的高温流变性能,获取了黏度(135℃)、车辙因子和疲劳因子3

个指标.135 ℃条件下的黏度通常用于评价沥青的施工和易性,而通过 DSR 试验获取的车辙因子和疲劳因子则用于评价沥青的抗车辙性能和抗疲劳性能.

3.1.1 黏度

图 3 是 135 ℃条件下 ERA 和 WCO 对沥青黏度的影响.由如图 3 可知:沥青的黏度随 ERA 掺量的增加而增大,但 WCO 与之相反.这是由于 ERA 本身具有较大黏度,而 WCO 通常为低黏稠度的油.与此同时,沥青黏度随 ERA 掺量的增加为非线性增长,高掺量时的增长趋势更加明显.在未掺入 WCO 的条件下,加入 24%ERA(1.46 Pa·s)比基质沥青(0.58 Pa·s)和加入 6%ERA(0.66 Pa·s)时的黏度分别提高了 151.7%和 121.2%,黏度提升较为明显,原因是在较低 ERA 掺量的条件下,ERA 改性沥青尚未形成完整的均匀结构,而当 ERA 掺量足够高时,欧洲岩沥青能充分地分散在沥青中,并使黏度明显地提高.然而,黏度随着 WCO 掺量的增加逐渐减小,说明 WCO 能明显地软化沥青,当 ERA 掺量为 24%时,加入 6%WCO(0.83 Pa·s)比加入 0%WCO(1.46 Pa·s)时的黏度降低了 43.2%.当 WCO 掺量较大且 ERA 掺量较小时,改性沥青的黏度可能会降至低于基质沥青.因此,为保证沥青具有较好的抗变形能力,建议 WCO 的掺量不宜过高.结果表明:ERA 可以有效地提升沥青的黏度,而 WCO 会降低黏度,因此,需要控制好 ERA 和 WCO 的掺量.较大的黏度使得沥青不易流动变形,表明沥青在高温下的抗变形能力越好.

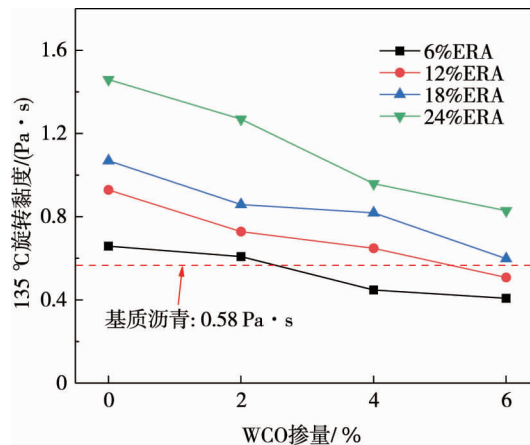


图 3 135 ℃条件下改性沥青的黏度

3.1.2 车辙因子和疲劳因子

DSR 试验温度扫描可以获取不同温度下的复数模量和相位角参数.车辙因子是复数模量与相位角正弦值的比值,通常用于评价沥青抵抗永久变形的能力;疲劳因子是复数模量与相位角正弦值的乘积,通常用于评价沥青抵抗疲劳破坏的能力.车辙因子与抗变形能力呈正相关关系,而疲劳因子越小表示沥青的抗疲劳性能越好.图 4 为沥青车辙因子和疲劳因子随温度和掺量变化的曲线.

如图 4a 所示,当 WCO 掺量保持在 4% 不变时,车辙因子随着 ERA 掺量的增加而逐渐增大.掺量为 12%ERA+4%WCO 时,改性沥青与基质沥青的车辙因子基本持平,并随着 ERA 掺量的增加而逐渐增大.这是由于 ERA 本身较大的刚度和弹性,可增加改性沥青的复数模量的同时降低相位角.值得注意的是,当 ERA 掺量为 18%时,改性沥青的车辙因子随 WCO 掺量的增加而呈减小趋势,表明 WCO 对沥青的高温抗永久变形能力起到一定的削弱作用.ERA 掺量不小于 12%和 WCO 掺量不大于 4%时,可保证改性沥青的抗车辙性能优于基质沥青.如图 4b 所示,疲劳因子与 ERA 掺量呈正相关关系,但与 WCO 掺量呈负相关关系,表明 WCO 更有利于沥青在重复荷载作用下应力的释放,而 ERA 由于较大的刚度并不利于沥青在重复荷载作用下的抗疲劳性能,6%ERA+4%WCO 改性沥青具有较优的抗疲劳性能.2 种改性剂对车辙因子和疲劳因子的影响规律表明:ERA 可有效地提升沥青的高温抗车辙能力,WCO 在提升沥青抗疲劳性能方面起主导作用.

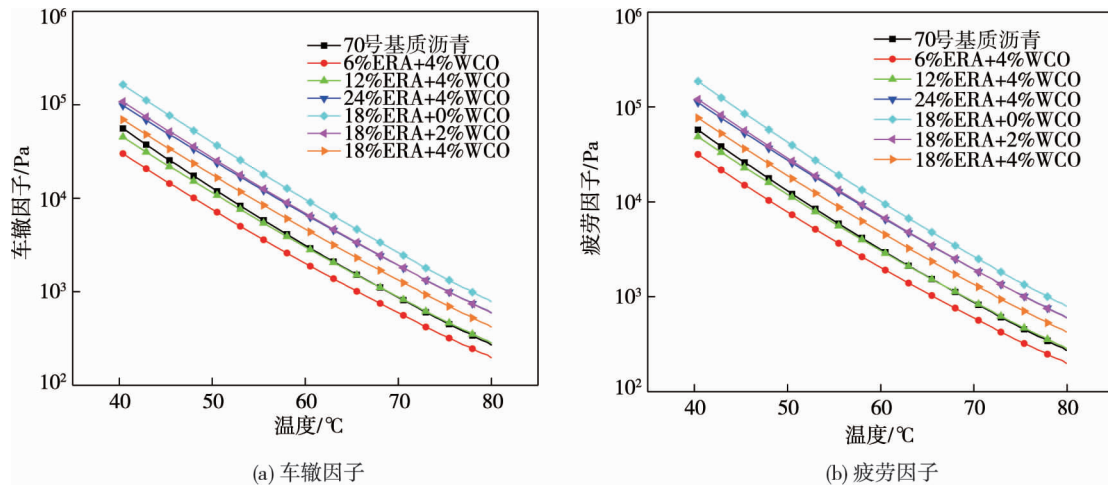


图 4 DSR 试验结果

3.2 ERA/WCO 改性沥青低温流变性能

低温弯曲梁流变试验是评价沥青在低温状态下抵抗开裂能力的主要手段之一,试验可获取 2 个评价指标:蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 。根据规范要求,试验结果需同时满足 $S \leq 300 \text{ MPa}$ 和 $m \geq 0.30$,以保证沥青在低温下具有足够的抗裂性能。在 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温条件下,由 BBR 试验获得的基质沥青以及改性沥青的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 结果如图 5 所示。

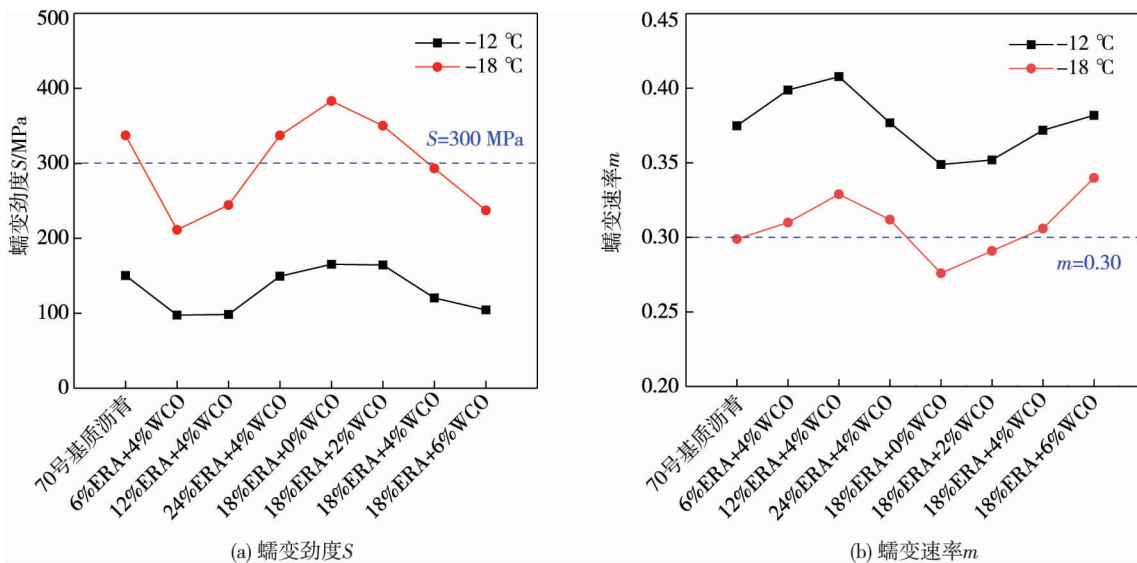


图 5 BBR 试验结果

由图 5 可知:所有试件均能满足在 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件时的规范要求,而在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下仅有部分试件满足规范要求。如图 5a 所示,与 70 号基质沥青相比,掺入 6%ERA+4%WCO 后,蠕变劲度 S 下降,表明 4%WCO 对沥青的软化效果比 6%ERA 对沥青硬度提升的效果更强,总体表现为 S 的下降。当 WCO 掺量为 4%时, S 随着 ERA 掺量的增加而增大,且在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下较大,与掺入 6%ERA 相比,掺入 24%ERA 时 S 在 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下分别增长了 53.5%和 59.7%,这是由于 ERA 的加入会使沥青变得更硬,其劲度模量也相应提高。然而,与 ERA 不同的是, S 随着 WCO 掺量的增加而逐渐降低,当 ERA 掺量为 18%时,掺入 6%WCO 比未掺入 WCO 时, S 在 $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下分别降低了 37.0%和 38.1%,这是由于 WCO 能软化沥青,使沥青在低温条件下具有较强的应力消散能力,因此,抗裂性能也随之增强。此外,由图 5b 中 m 随改性剂掺量的变化规律可知: m 随着 ERA 掺量的增长呈现先增大后减小的趋势,但 m 随着 WCO 掺量的增加逐渐增大。结合 S 和 m 的试验结果,仅有 6%ERA+4%WCO, 12%ERA+4%WCO, 18%ERA+4%WCO 和 18%ERA+6%WCO 这 4 组情况能够满足 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件的规范要求,其低温抗裂性能较优越。综上,ERA 可有效地提升沥青

的蠕变劲度,但掺量应适量以保证沥青的应力消散能力,而 WCO 可显著地提升沥青的蠕变速率,但过量的 WCO 会大幅降低沥青的劲度模量,2 种改性剂的掺量需合理搭配才可有效地提升沥青的低温抗裂性。

4 ERA/WCO 改性沥青混合料流变性能研究

4.1 ERA/WCO 改性沥青混合料高温性能

采用马歇尔稳定度试验和车辙试验评价 ERA 和 WCO 对沥青混合料在高温状态下抗变形能力的影响。

4.1.1 马歇尔稳定度

应用马歇尔稳定度仪对马歇尔标准试件施加竖向荷载,记录试件在试验过程中的荷载-位移曲线,得到峰值荷载(即马歇尔稳定度)和峰值荷载时的变形量(流值),然后通过计算可获取马歇尔模数指标(马歇尔稳定度与流值之比)。马歇尔稳定度、流值和马歇尔模数可用于评价沥青混合料的抗永久变形能力。

沥青混合料的马歇尔试验结果如图 6 所示。由图 6a 可知:相比于基质沥青,改性沥青的马歇尔稳定度有不同程度的增大,而流值则有不同程度的降低。18%ERA+0%WCO 改性沥青比基质沥青的马歇尔稳定度上升了 23.2%,流值下降了 19.6%。当 ERA 掺量固定为 18%时,马歇尔稳定度随着 WCO 掺量的增加而逐渐减小,加入 4%WCO 比加入 0%WCO 的马歇尔稳定度降低了 14.1%。与之相反的是,当 4%WCO 掺量不变时,加入 18%ERA 比加入 12%ERA 的马歇尔稳定度提高了 5.2%,当改性剂掺量为 12%ERA+4%WCO 时,改性沥青的马歇尔稳定度以及流值均与基质沥青相差不大,表明 12%ERA 与 4%WCO 对沥青的混合料的影响刚好可以相抵。对于流值而言,其大小则与 ERA 的掺量呈正相关而与 WCO 的掺量呈负相关。由图 6b 可知:马歇尔模数随改性剂掺量的变化与马歇尔稳定度类似,18%ERA+0%WCO 改性沥青比基质沥青的马歇尔模数增长了 50.9%,而 12%ERA+4%WCO 改性沥青比基质沥青的马歇尔模数仅增长了 2.9%。综上所述,ERA 可有效地提升沥青混合料的高温抗变形能力,但 WCO 会对沥青混合料的高温性能有不利影响。

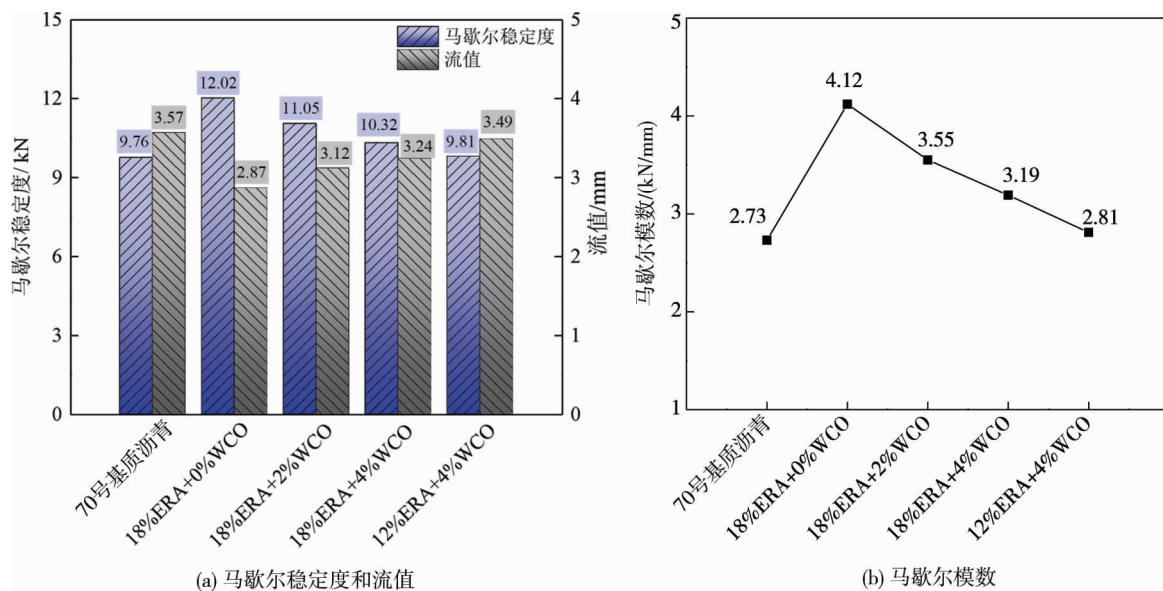


图6 沥青混合料马歇尔试验结果

4.1.2 动稳定度

动稳定度是另一个评价沥青混合料高温抗变形能力的指标,由室内车辙试验获得。沥青混合料车辙试验结果如图 7 所示。由图 7 可知:改性沥青的动稳定度较基质沥青有极大幅度地提升,18%ERA+0%WCO 改性沥青(4 988 次/mm)的动稳定度是基质沥青(1 563 次/mm)的 3.19 倍。当 WCO 掺量为 4%时,18%ERA 比 12%ERA 的动稳定度增长了 19.0%。这是由于,ERA 可增强沥青的黏度,从而增强了沥青与集料之间的黏结强度。然而,随着 WCO 掺量的增加,动稳定度呈下降趋势。当 ERA 掺量固定为 18%不变时,加入 4%WCO 比加入 0%WCO 的动稳定度下降了 30.6%,但改性沥青的动稳定度整体上要高于基质沥青,表明

WCO 会降低沥青的刚度,这不利于沥青混合料的高温抗变形能力.动稳定度随着 WCO 掺量的增加而逐渐减小,该结果与马歇尔试验得到的结果相同,但值得注意的是,12%ERA+4%WCO 改性沥青的马歇尔稳定度与基质沥青相当,而动稳定度则明显高于基质沥青,这表明改性沥青能显著地提升混合料的抗车辙性能.

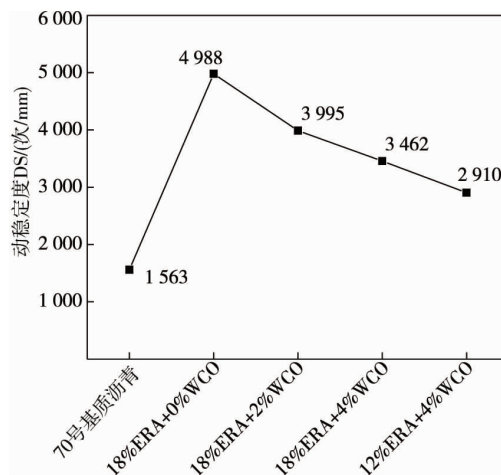


图 7 沥青混合料车辙试验结果

4.2 ERA/WCO 改性沥青混合料低温性能

图 8 为沥青混合料的低温劈裂强度、破坏劲度模量以及破坏拉伸应变结果.一般来说,劈裂强度和劲度模量越大,表明材料在低温状态下越硬、越脆,而拉伸应变越大表明材料在荷载作用下的允许变形越大.由图 8a 可知:18%ERA+0%WCO 改性沥青比基质沥青的劈裂抗拉强度提升了 73.9%,破坏劲度模量提升了 56.3%,表明 ERA 可以显著地提升沥青混合料在低温状态下抵抗荷载的能力,但同时也使材料变硬变脆,这将会增加出现低温开裂的风险.随着 WCO 的掺入,劈裂抗拉强度呈现先减小后增大的趋势,原因可能是由于低掺量的 WCO 仅使沥青变软,导致劈裂强度下降,而增大 WCO 的掺量后,沥青在变软的同时也提高了沥青与集料的黏附性,使混合料的低温劈裂强度有一定程度的提高.18%ERA+4%WCO 改性沥青的劈裂抗拉强度达到了 3.06 MPa,表明 WCO 兼具提高强度和改善低温变形两方面的性能,可以有效地提升沥青混合料的低温抗裂能力,弥补因 ERA 在低温下造成的沥青变硬变脆问题.此外,如图 8b 所示,当 ERA 掺量为 18%时,加入 4%WCO 比加入 0%WCO 的破坏拉伸应变提高了 146.5%,表明 WCO 可极大地提高沥青混合料在低温状态下的变形能力.综上,ERA 会使沥青混合料在低温时变硬变脆,不利于抗裂性能,而 WCO 可弥补 ERA 改性沥青混合料在低温抗裂性能上的不足.

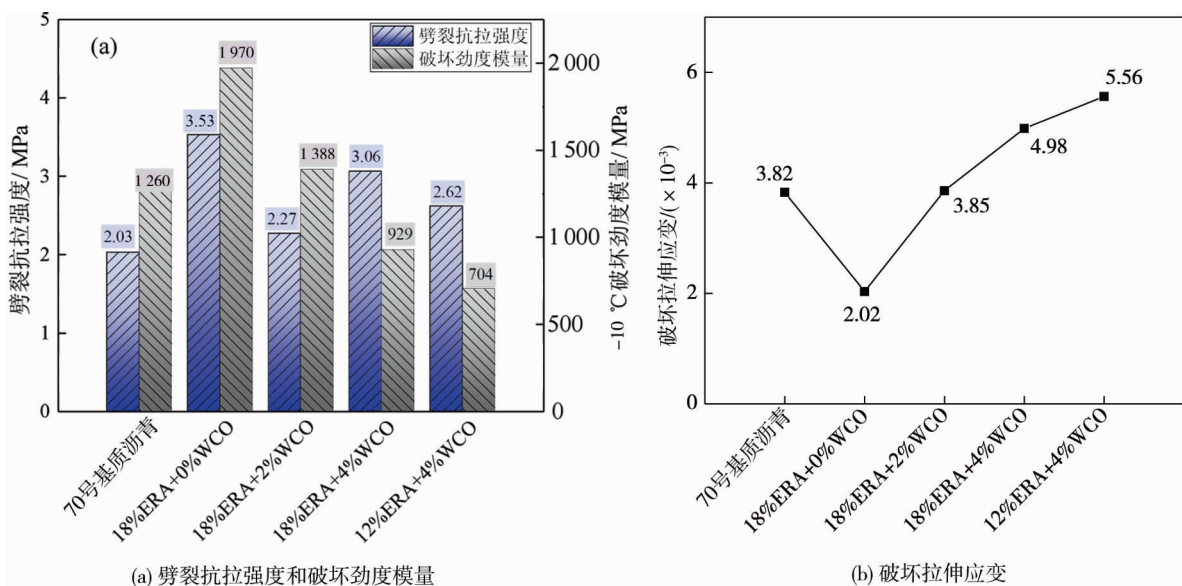


图 8 沥青混合料低温劈裂试验结果(-10 °C)

5 结论

1) ERA 可有效地提升沥青的黏度,较大的黏度使得沥青不易流动变形,有利于提升沥青的抗变形能力.掺入 WCO 后黏度有所下降,但 ERA/WCO 复合改性沥青的黏度仍高于基质沥青,黏度的降低有利于沥青的施工和易性.ERA 可有效地提升沥青的高温抗车辙能力,而 WCO 可显著地提升沥青的抗疲劳性能.

2) ERA 可提升沥青的劲度模量,而 WCO 可改善沥青的应力消散能力,合理掺量时的 ERA/WCO 复合改性沥青具有较优的低温抗裂性.

3) ERA 可有效提升沥青混合料的高温抗变形能力,然而 WCO 的掺入会削弱高温性能,建议 WCO 的掺量不宜超过 4%.

4) ERA 会使沥青混合料在低温时变硬变脆,不利于沥青混合料低温抗裂性能的表现,而 WCO 可弥补 ERA 改性沥青混合料在低温抗裂性能上的不足.因此,推荐使用 18%ERA+4%WCO 对沥青进行复合改性,复合改性沥青具有最优的高温性能和低温性能.

参考文献:

- [1] Yan K Z, Hong Z, You L Y, et al. Influence of ethylene-vinyl acetate on the performance improvements of low-density polyethylene-modified bitumen[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123865.
- [2] Zhu H R, Xu G, Gong M H, et al. Recycling long-term-aged asphalts using bio-binder/plasticizer-based rejuvenator[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 147: 117-129.
- [3] Gökalp I, Volkan E U. Utilizing of Waste Vegetable Cooking Oil in bitumen; Zero tolerance aging approach[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 227: 116695.
- [4] Zhang L, Bahia H, Tan Y Q. Effect of bio-based and refined waste oil modifiers on low temperature performance of asphalt binders[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 86: 95-100.
- [5] 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.
- [6] 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):55-61.
- [7] Li X L, Lv X C, Wang W Q, et al. Crack resistance of waste cooking oil modified cement stabilized macadam [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 243: 118525.
- [8] Ahmed R B, Hossain K. Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: A state-of-the-art review[J]. *Construction and Building Materials*, 2020,230 :116985.
- [9] 张曼.欧洲岩沥青与废食用油复合改性沥青及其混合料性能研究[D].长沙:湖南大学,2020.
- [10] 索智,季节,满琦,等.植物油再生沥青的性能研究[J].*北京工业大学学报*,2016,42(7):1062-1065.
- [11] 牛东瑜,马英新,仁乾龙珠,等.加工参数对地沟油/废旧橡胶粉复合改性沥青性能的影响[J].*江苏大学学报(自然科学版)*,2018,39(3):355-361.
- [12] Sun D Q, Lu T, Xiao F P, et al. Formulation and aging resistance of modified bio-asphalt containing high percentage of waste cooking oil residues[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161: 1203-1214.
- [13] Zhang L, Tan Y Q, Bahia H. Relationship between glass transition temperature and low temperature properties of oil modified binders[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 104: 92-98.
- [14] Yan K Z, Liu W Y, You L Y, et al. Evaluation of waste cooling oil and European Rock Asphalt modified asphalt with laboratory tests and economic cost comparison[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021,310:127364.
- [15] 查旭东,童恋.印尼布敦岩沥青改性沥青性能研究[J].*长沙交通学院学报*,2007,23(4):28-32.
- [16] 曾梦澜,朱艳贵,田伟,等.欧洲岩沥青改性沥青混合料使用性能试验研究[J].*湖南大学学报(自然科学版)*,2017,44(7):156-161.