

文章编号:1671-8879(2018)02-0001-08

废胶粉/APAO 复合改性沥青性能

颜可珍,陈 明,胡 玥

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:为了研究废胶粉(WTR)与非晶态 α -烯烃共聚物(APAO)对沥青复合改性的效果以及其最优加工工艺。首先采用高速剪切法制备多组不同掺量的 WTR/APAO 复合改性沥青;然后测定 WTR/APAO 复合改性沥青的针入度、软化点、黏度、弹性恢复,同时进行了存储稳定性分析与荧光显微镜微观检测;最后通过正交试验确定 WTR/APAO 复合改性沥青最优加工工艺。研究结果表明:WTR 与 APAO 的掺量(质量分数,下同)分别为 15%与 4%时,WTR/APAO 复合改性沥青的针入度比基质沥青降低了 36.8 mm,软化点增加了 22.9 $^{\circ}\text{C}$,弹性恢复增加了 67%,黏度(180 $^{\circ}\text{C}$)增加 81%,且其各项指标均满足橡胶沥青评价指标要求;加入适量的 WTR 与 APAO 后基质沥青的高温性能和可恢复变形能力得到明显提高,WTR/APAO 复合改性沥青具有较好的改性效果;与 WTR 单独改性相比,加入 APAO 能使针入度进一步减小,软化点、黏度与弹性恢复进一步增加,APAO 的加入能进一步提升 WTR 的改性效果;加入 4%的 APAO 后,WTR/APAO 复合改性沥青比仅掺入 15%的 WTR 改性沥青的软化点降低了 3.3 $^{\circ}\text{C}$,APAO 的加入能显著提高废胶粉改性沥青的存储稳定性,弥补了废胶粉改性沥青的不足;APAO 不仅增进了 WTR 的分散程度,而且改善了 WTR 与沥青相的相容性。WTR/APAO 复合改性沥青最优加工工艺基本参数为:先加入 WTR,后加入 APAO,控制剪切温度 190 $^{\circ}\text{C}$,剪切时间 90 min,剪切速度 5 000 r/min。

关键词:道路工程;APAO;复合改性沥青;制备工艺

中图分类号:U414.1

文献标志码:A

Performance of composite modified asphalt by waste rubber powder and amorphous poly alpha olefin

YAN Ke-zhen, CHEN Ming, HU Yue

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the influence of waste rubber powder (WTR) and amorphous poly alpha olefin (APAO) on composite modified asphalt and its optimum processing technology, multiple groups of blending quantity of WTR/APAO composite modified asphalt were prepared by using high-speed shearing method at first, then the penetration, softening point, viscosity and elastic recovery of WTR/APAO composite modified asphalt were measured, and simultaneously, the storage stability analysis and microscopic examination of fluorescence microscope were carried out. Finally, the optimum processing technology of WTR/APAO composite modified asphalt was determined by orthogonal test. The results show that when the blending quantity of waste rubber

收稿日期:2017-09-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50808077,51278188);湖南省普通高校青年骨干教师培养计划项目

作者简介:颜可珍(1975-),男,湖南桃江人,教授,博士研究生导师,E-mail:yankz2004@163.com。

powder and APAO (mass fraction, the same below) is 15% and 4%, respectively, the penetration of WTR/APAO composite modified asphalt is lower than that of matrix asphalt by 36.8 mm, the softening point increases by 22.9 °C, the elastic recovery increases by 67%, and the viscosity (180 °C) increases by 81%. And all indexes meet the requirements of the evaluation index of rubber asphalt. This indicates that after adding appropriate amount of WTR and APAO, high temperature performance and recoverable deformation ability of matrix asphalt are significantly improved, and WTR/APAO composite modified asphalt has better modification effect. Moreover, compared to WTR modification alone, the addition of APAO can result in a further decrease in penetration and a further increase in softening point, viscosity and elastic recovery, the addition of APAO can further enhance the effect of WTR modification alone. The storage stability experiment reveals that the softening point difference of WTR/APAO composite modified asphalt decreases by 3.3 °C compared to waste rubber powder modified asphalt with the blending quantity of 15% alone after adding 4% APAO, which proves that the addition of APAO can significantly improve the storage stability of the waste rubber powder modified asphalt and can make up for the deficiency of waste rubber powder modified asphalt. Fluorescence microscopy experiments also show that APAO not only enhances the dispersion of WTR, but also improves the compatibility of WTR with asphalt. The basic parameters of the optimal processing technology for WTR/APAO composite modified asphalt are that WTR is added before APAO, and shear temperature 190 °C, the sheared time 90 min, and shear rate 5 000 r/min. 6 tabs, 7 figs, 26 refs.

Key words: road engineering; APAO; composite modified asphalt; preparation technique

0 引言

废胶粉(WTR)对沥青有着很好的改性效果,其可改善沥青的高低温性能、老化性能,并能提高行车的舒适度和安全等级,具有很好的环保性能^[1-6]。但是许多学者研究发现废胶粉单独改性沥青也存在很多不足,废胶粉与沥青的相容性不好,并且废胶粉对沥青综合性能的改善效果不太明显,这些不足制约了其在道路沥青领域上的广泛运用^[7-13]。非晶态 α -烯烃共聚物(amorphous poly alpha olefin, APAO)是一种无定形 α -烯烃,是利用特殊催化剂使丙烯单体或者丙烯与乙烯,或者丙烯与丁烯共聚形成的分子量较低的无定形烯烃类聚合物,外观为乳白色固体,有一定韧性,其分子空间结构是无规则排列,具有良好的耐酸、耐碱、抗氧化性能。沈金安等对 APAO 改性沥青研究发现, APAO 改性沥青不仅制备工艺简单、造价低,而且 APAO 与沥青极易融合^[14-15]; Wei 等研究发现, APAO 提高了沥青的高温性能,降低了沥青的温度敏感性,但不利于沥青的低温性能^[16]。除了改性沥青, APAO 还能用于橡胶的改性,它能与橡胶很好地混溶,可提高橡胶的抗氧化能力。

基于 WTR、APAO 分别对沥青改性的优缺点及 APAO 能与橡胶很好地混溶的特性,本文提出用 WTR 与 APAO 对沥青进行复合改性,并对这种新的复合改性沥青进行初步探索。首先参考橡胶沥青评价指标,评价 WTR/APAO 复合改性沥青的改性效果。在确定其优良的改性效果后,通过正交试验方法^[17-18]确定 WTR/APAO 复合改性沥青的最优工艺参数,并对其存储稳定性、微观分布形态进行分析。这对其后续研究及工程运用具有重要意义。

1 试验

1.1 试验原材料及其主要性能指标

基质沥青为宝利 70# 重交道路石油沥青,其基本性质为:25 °C 针入度为 64.6 (0.1 mm), 15 °C 延度为 138.7 cm, 软化点为 48.7 °C, 弹性恢复为 20%。废胶粉为武汉合得利橡胶粉有限公司生产的 80 目废轮胎橡胶粉, 筛余物 8%, 灰分 7.6%, 密度 3.65 g/cm³。APAO 为美国亨斯迈 2385, 密度 1.41 g/cm³, 熔点 295 °C。2 种改性剂的样品分别见下页图 1。

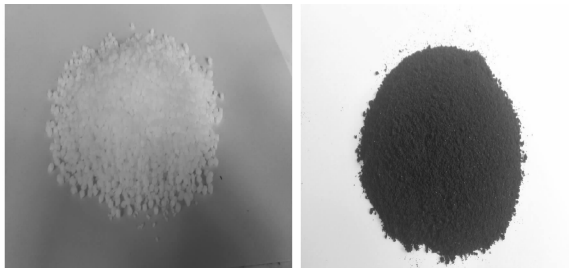


图 1 两种改性剂样品
Fig. 1 Samples of two kinds of modifier

1.2 试验方案

1.2.1 复合改性沥青的制备

APAO 与沥青极易相融,而橡胶粉与沥青融合困难,故主要参考橡胶粉改性沥青制备工艺。首先将基质沥青加热后加入到高速剪切仪中,同时加入废胶粉与 APAO,温度控制在 180 ℃ 左右,转速为 5 000 r/min,高速剪切 60 min,剪切完成后普通搅拌 20 min(去除气泡),最后得到复合改性沥青。

1.2.2 复合改性沥青的配方设计

参考国内外关于橡胶粉改性沥青^[19]与 APAO 改性沥青的研究成果^[20],采用不同掺量的 APAO 与废胶粉制备复合改性沥青。其中,APAO 的掺量(质量分数,下同)分别为 0%、4%、8%,橡胶粉掺量分别为 0%、5%、10%、15%、20%。采用橡胶沥青评价指标^[21](表 1)研究改性剂掺量对复合改性沥青针入度、软化点、弹性恢复、黏度的影响,分析评价 WTR/APAO 复合改性沥青的改性效果。各试验的具体要求、步骤均参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)。

表 1 橡胶沥青技术标准

Tab. 1 Technical standards for rubber asphalt

测试项目	规范值	15% WTR+4% APAO
黏度(180 ℃)/(Pa·s)	1.5~4.0	2.112
软化点/℃	>54	71.6
针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	25~70	27.8
弹性恢复/%	>60	87

2 试验结果

2.1 针入度和软化点

图 2、图 3 给出了不同掺量的 WTR/APAO 复合改性沥青的针入度和软化点结果。可以看出,在固定 WTR(APAO)下,随着 APAO(WTR)的掺量增加,复合改性沥青的针入度呈减小趋势,而软化点呈增大趋势。其中,针入度最小值为 19.8

(0.1 mm),软化点最大值为 79.6 ℃,与基质沥青相比,针入度减小了 44.8 (0.1 mm),软化点增大了 30.9 ℃。这表明加入 WTR 与 APAO 后沥青的高温性能显著提高;此外,复合改性沥青的软化点明显高于 WTR 或 APAO 单独改性的软化点,说明复合改性后的沥青体系中形成了更稳定的结构。在固定 WTR 掺量下每增加 4% 的 APAO,针入度、软化点变化幅度要比固定 APAO 掺量下每增加 5% 的 WTR 大,且与 WTR 单独改性相比,加入 APAO 后明显减小了针入度,增大了软化点。这表明 APAO 改性的效果比 WTR 更好,且 APAO 能进一步提升 WTR 单独改性的效果;当 APAO 掺量超过 4% 时,继续增加两者掺量,针入度、软化点变化幅度明显减小。当 APAO 掺量为 8% 且 WTR 超过 5% 时,复合改性沥青针入度小于橡胶沥青评价指标规定值 25 (0.1 mm)。这表明两者掺量并非越大越好,当 WTR 掺量为 15% 或 20%、APAO 掺量为 4% 时是较优的组合。

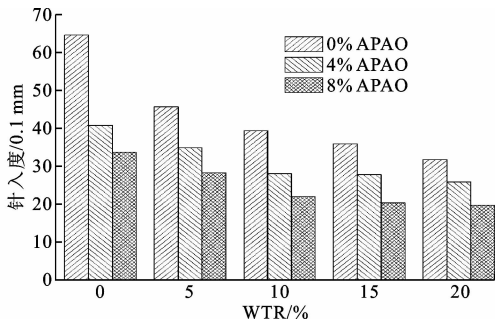


图 2 针入度测试结果
Fig. 2 Penetration test results

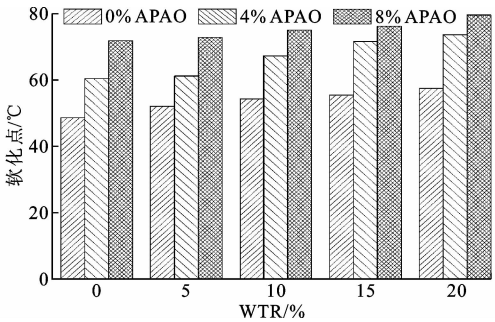


图 3 软化点测试结果
Fig. 3 Softening point test results

2.2 弹性恢复

弹性恢复用于评价改性沥青的可恢复变形能力,提高沥青的弹性恢复能力可以减小荷载作用下的残余变形,减少路面的损坏。下页图 4 为不同掺量的 WTR/APAO 复合改性沥青的弹性恢复结果。由图 4 可知,在固定 WTR(APAO)下,随着 APAO

(WTR)的掺量增加,复合改性沥青的弹性恢复呈增大趋势。其中,弹性恢复最大值达到 94%,这与 SBS 类改性沥青弹性恢复的效果相当^[22]。这也表明,加入 WTR 与 APAO 后沥青的可恢复变形能力明显提高;加入 4%的 APAO 后复合改性沥青弹性恢复最小值(76%)都比 WTR 单独改性的最大值(68%)大。由此可见,APAO 的加入进一步显著提升了 WTR 单独改性的效果。产生这种现象的原因可能是:一方面 APAO 与 WTR 能很好地混溶,APAO 与 WTR 颗粒有可能彼此间相互连接,形成具有一定柔韧性的连续网状结构;另一方面,APAO 会黏附或填充到 WTR 已形成的网状结构中,使网状结构弹性变大,从而使沥青的弹性恢复得到提升。

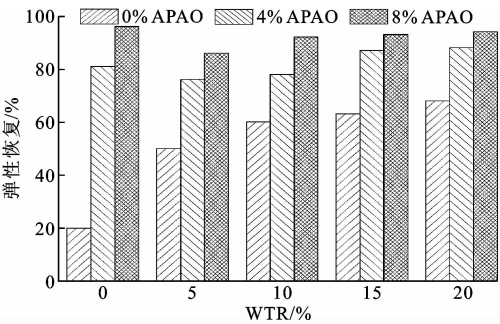


图 4 弹性恢复测试结果
Fig. 4 Elastic recover test results

当 APAO 掺量一定时,随着 WTR 的加入,弹性恢复呈增大趋势,但均比 APAO 单独改性时低。造成这种现象的原因是:随着 WTR 掺量增大,溶胀后的 WTR 颗粒能够彼此相互连接,形成具有一定柔韧性的连续网状结构,所以弹性恢复增大。但是 WTR 在溶胀过程中会吸收沥青中的轻质分子,使沥青变硬,故加入 WTR 后弹性恢复值比单独 APAO 改性要低。

2.3 旋转黏度

图 5 为不同掺量的 WTR/APAO 复合改性沥青 180 ℃ 旋转黏度值结果。由图 5 可知,在固定 WTR(APAO)下,随着 APAO(WTR)的掺量增加,旋转黏度迅速增加。而黏度越大表明 WTR 和 APAO 对沥青的高温性能有显著的改善作用。且与单独 WTR(APAO)改性相比,APAO(WTR)的加入进一步提高了旋转黏度。但是,若黏度过大,沥青的和易性和可泵性会变差,在混合料拌和及路面施工过程中会引发一系列问题。根据橡胶沥青评价指标 15%WTR、4%APAO;15%WTR、8%APAO;20%WTR、0%APAO,这 3 组掺量的旋转黏度分别为 2.112、2.433 与 2.416,满足橡胶沥青评价指标

要求。

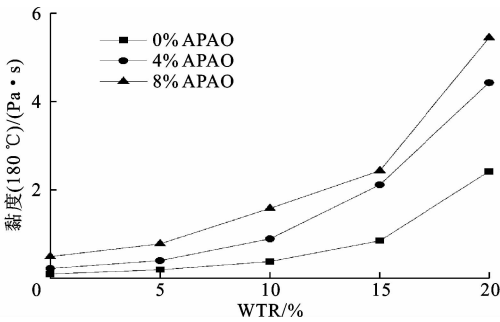


图 5 黏度测试结果
Fig. 5 Viscosity test results

综合考虑针入度、软化点、弹性恢复、旋转黏度 4 个评价指标可知,仅当 WTR 与 APAO 掺量分别为 15%、4%时,满足橡胶沥青评价指标(表 1)。

3 确定最优工艺参数

研究结果表明,WTR/APAO 复合改性沥青有很好的改性效果,而工艺优化能使聚合物更均匀、更充分地分布于沥青中,使聚合物更好地发挥改性效果。因此,下文将进一步研究确定 WTR/APAO 最优工艺参数。在确定复合改性沥青工艺参数时,改性剂添加顺序、剪切温度、剪切时间、剪切速度是影响工艺参数主要因素^[23-24]。为了控制变量,根据前文研究结果,下文试验中取 2 种改性剂掺量,分别为 15%WTR、4%APAO。

3.1 改性剂添加顺序

首先,只考虑 2 种改性剂不同添加顺序,其他试验条件一致。试验方案如下,试验结果见表 2。

方案 1:先往基质沥青中加入橡胶粉,普通搅拌 30 min,然后加入 APAO,高速剪切 60 min,最后普通搅拌 20 min。

方案 2:先往基质沥青中加入 APAO,普通搅拌 30 min,然后加入橡胶粉,高速剪切 60 min,最后普通搅拌 20 min。

方案 3:往基质沥青中同时加入橡胶粉与 APAO,普通搅拌 30 min,然后高速剪切 60 min,最后普通搅拌 20 min。

表 2 两种改性剂不同添加顺序试验结果

Tab. 2 Different adding order test results of two kinds of modifier			
测试项目	方案 1	方案 2	方案 3
软化点/℃	73.8	76.2	74.2
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/0.1 mm	29.3	25.1	27.6
弹性恢复 %	89	87	88
延度(25 ℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	17.8	12.4	15.5
黏度(180 ℃)/(Pa·s)	2.200	2.747	2.360

3 种方案中普通搅拌为180 ℃、2 000 r/min,高速剪切为 180 ℃、5 000 r/min。

由表 2 可知,方案 1 的弹性恢复与延度值最大,综合考虑复合改性沥青高低温性能,取方案 1 为最优方案。方案 1 中延度值明显高于其他 2 种方案,这可能是因为先加入橡胶粉能使其与沥青轻质组分充分溶胀,故制得的复合改性沥青混合更加均匀。下文试验将根据此最优添加顺序依次加入改性剂。

3.2 正交试验方案

考虑到剪切温度、剪切时间、剪切速度^[25] 3 个因素决定改性剂的分散效果^[19],试验采用正交试验

表 3 正交试验设计

Tab. 3 Orthogonal test design

序号	剪切 温度/℃	剪切 时间/min	剪切速度/ ($r \cdot \min^{-1}$)	针入度(25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	软化点/℃	弹性恢复/%	延度(25 ℃, 5 $\text{cm} \cdot \min^{-1}$)/cm	黏度(180 ℃)/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
1	170	30	3 000	30.0	72.1	83	12.9	1.760
2	170	60	4 000	31.4	75.0	89	16.4	2.233
3	170	90	5 000	29.3	76.5	90	18.4	2.288
4	180	30	4 000	29.7	77.0	88	15.9	2.388
5	180	60	5 000	29.3	73.8	89	17.8	2.200
6	180	90	3 000	32.2	79.1	91	18.2	2.540
7	190	30	5 000	30.4	80.3	90	18.0	2.620
8	190	60	3 000	31.3	79.0	92	17.8	2.357
9	190	90	4 000	31.2	78.2	91	18.3	2.347

表 4 正交试验结果

Tab. 4 Orthogonal test results

参数		方案 1	方案 2	方案 3
针入度 (25 ℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	均值 K1	30.2	30.0	31.2
	均值 K2	30.4	30.7	30.8
	均值 K3	31.0	30.9	29.7
	极差值 R	0.8	0.9	1.5
软化点/℃	均值 K1	74.5	76.5	76.7
	均值 K2	76.6	75.9	76.7
	均值 K3	79.2	77.9	76.9
	极差值 R	4.7	2.0	0.2
弹性恢复/%	均值 K1	87.3	87.0	88.7
	均值 K2	89.3	90.0	89.3
	均值 K3	91.0	90.7	89.7
	极差值 R	3.7	1.8	1.0
延度(25 ℃, 5 $\text{cm} \cdot \min^{-1}$)/ cm	均值 K1	15.9	15.6	16.3
	均值 K2	17.3	17.3	16.9
	均值 K3	18.0	18.3	18.1
	极差值 R	2.1	2.7	1.8
黏度 (180 ℃)/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	均值 K1	2.090	2.256	2.219
	均值 K2	2.380	2.263	2.323
	均值 K3	2.440	2.391	2.369
	极差值 R	0.350	0.135	0.150

设计方法,对制备 WTR/再生低密度聚乙烯(RPE)复合改性沥青的加工工艺试验进行设计。根据针入度、软化点、延度、弹性恢复、黏度来分析各工艺参数对沥青复合改性效果的影响。各工艺参数取值范围根据文献[9]的研究成果确定,每个工艺参数选取 3 个水平,具体取值见表 3。

3.3 结果与分析

按表 3 因素水平进行正交试验,结果见表 4。依据直观分析方法进行分析,对于不同的评价指标,各因素的极差值不相同。一般来说,极差值大的因素也就是主要因素。由表 3、表 4 数据可得如下结论。

(1)测定针入度时,剪切速度所对应的极差最大,而剪切温度所对应的极差最小,因此各工艺参数对WTR/RPE复合改性沥青针入度的影响程度由大到小依次为:剪切速度、剪切时间、剪切温度。在 3 种水平下,均值最小所对应的参数是该因素的最佳取值。因此高速剪切搅拌制备改性沥青的工艺参数可以选择为:剪切温度 170 ℃、剪切时间 30 min、剪切速度 5 000 r/min。

(2)测定软化点时,根据极差可知,各工艺参数影响程度由大到小依次为:剪切温度、剪切时间、剪切速度。而由均值中最大值所对应的可作为制备复合改性沥青的工艺参数为:剪切温度190 ℃、剪切时间90 min、剪切速度 5 000 r/min。

(3)研究沥青的弹性恢复时,同样根据极差,各工艺参数影响程度由大到小依次为:剪切温度、剪切时间、剪切速度。而由均值中最大值所对应的可作为制备复合改性沥青的工艺参数为:剪切温度 190 ℃、剪切时间90 min、剪切速度 5 000 r/min。

(4)对于沥青的延度,各工艺参数影响程度由大到小依次为:剪切时间、剪切温度、剪切速度。而由

均值中最大值所对应的可作为制备复合改性沥青的工艺参数为:剪切温度190℃、剪切时间90 min、剪切速度5 000 r/min。

(5)对于沥青的180℃黏度,各工艺参数影响程度由大到小依次为:剪切温度、剪切速度、剪切时间。而由均值中最大值所对应的可作为制备复合改性沥青的工艺参数为:剪切温度190℃、剪切时间90 min、剪切速度5 000 r/min。

通过以上分析可知,通过针入度指标得到的工艺参数为工艺①:剪切温度170℃、剪切时间30 min、剪切速度5 000 r/min。其他指标得到的工艺参数均为工艺②:剪切温度190℃、剪切时间90 min、剪切速度5 000 r/min。通过补充试验,用这2组工艺水平分别制备改性沥青,试验结果见表5。

表5 不同生产工艺试验结果
Tab.5 Results of different manufacture processes

测试项目	工艺①	工艺②
软化点/℃	73.4	80.6
针入度(25℃,100 g,5 s)/0.1 mm	29.8	30.2
弹性恢复%	85	92
延度(25℃,5 cm·min ⁻¹)/cm	16.3	19.2
黏度(180℃)/(Pa·s)	2.264	2.873

由表5可知,工艺②针入度虽然比工艺①要大,但是两者很接近,而软化点、弹性恢复、延度、黏度明显优于工艺①,故工艺②更优。综合可最终确定制备WTR/RPE复合改性沥青的最优工艺参数组合为:先加入废胶粉,再加入APAO,控制剪切温度190℃,剪切时间90 min,剪切速度5 000 r/min。得到的制备改性沥青工艺流程见图6。

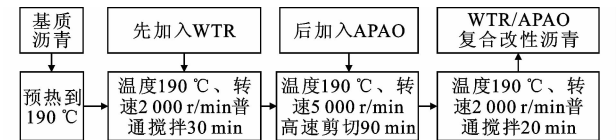


图6 WTR/APAO复合改性沥青加工工艺流程

Fig.6 Flow of WTR/APAO composite modified asphalt process

3.4 存储稳定性分析

根据最优工艺参数制备3组不同掺量的复合改性沥青,测定在163℃经过48 h的热储藏后,离析试样管上部与下部的软化点差。试验结果见表6。

由表6可知,单独加入4%的APAO后,APAO改性沥青离析试样管的上部与下部的软化点差为0.3℃,这说明APAO与沥青的相容性很好,基本不离析。加入15%WTR离析试样管的上部与下部

表6 储存稳定性试验

Tab.6 Results of storage stability test

沥青样本	上部	下部	软化点差值/℃
4%APAO	62.6	62.9	0.3
15%WTR	61.8	66.8	5.5
4%APAO+15%WTR	77.6	79.8	2.2

的软化点差为5.5℃,表明WTR改性沥青的储存稳定性差,易离析。而15%WTR/4%APAO复合改性沥青软化点差仅为2.2℃,满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)对聚合物改性沥青技术要求(<2.5℃),故用最优工艺制备的WTR/APAO复合改性沥青有较好的储存稳定性。与仅掺入15%WTR相比,温度差降低了3.3℃,这表明APAO的加入进一步提高了WTR的储存稳定性。这可能是因为APAO不仅与沥青极易混溶,而且APAO能与橡胶很好地混溶,故改性后的沥青体系中形成了更稳定的结构,从而有效阻止了橡胶粉的物理沉降。

3.5 微观分布形态

聚合物相在受到蓝色荧光照射时,会激发出波长较长的黄色光,而沥青相则不受荧光激发仍为黑色,由此可以清晰地区分沥青相和聚合物相^[26],荧光显微镜即采用这一原理来观察改性沥青中改性剂的分布形态。

下页图7为采用荧光显微镜观察到的不同WTR、APAO掺量的改性沥青荧光图像。观察图7(b)可知,橡胶粉在与沥青高温充分混合状态下吸收沥青轻质组分而溶胀,同时在颗粒表面形成沥青质含量很高的凝胶膜,橡胶粉颗粒通过凝胶膜连接,在沥青中形成了相互联系的网状结构。而加入4%的APAO后[图7(c)],二者分布更为均匀,故加入APAO后,不仅增进了WTR的分散程度,也改善了WTR与沥青相的相容性。二者共同形成了更为均匀连续的网状结构。这之前常规试验得到的结论相吻合。随着WTR含量的增加[图7(d)],二者在沥青中的分布更为紧密,且还保持着良好的分散性。

4 结 语

(1)WTR/APAO复合改性沥青大幅提高了沥青的高温性能与可恢复变形能力,表明WTR与APAO这种新的复合改性组合对沥青具有较好的改性效果。

(2)与单独的废胶粉改性沥青相比,APAO的加入使其针入度进一步减小,软化点、弹性恢复进一

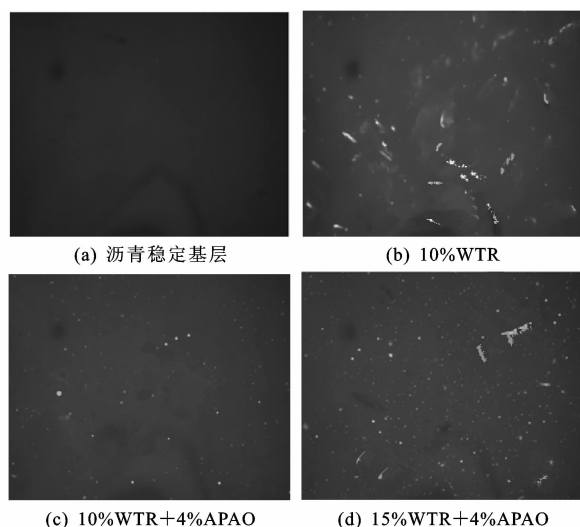


图7 荧光显微镜图像

Fig. 7 Fluorescence microscope images

步增大,说明 APAO 的加入有效提高了废胶粉改性沥青的性能。

(3)掺入 15%WTR 和 4%APAO 时,复合改性沥青各项指标均满足橡胶沥青评价指标,这对于 WTR/APAO 复合改性沥青今后运用于实际工程具有重要意义。

(4)制备 WTR/APAO 复合改性沥青的最优加工工艺为:先将基质沥青预热到 190℃,接着加入橡胶粉,以 2 000 r/min 的速度持续普通搅拌 30 min,再加入 APAO,维持温度为 190℃,以 5 000 r/min 高速剪切搅拌 90 min;最后,仍保持 190℃的温度,以 2 000 r/min 的速度持续普通搅拌 20 min,以去除高速剪切搅拌时混入沥青中的气泡。

(5)存储稳定性试验证明 APAO 的加入有效地降低了 WTR 的离析,荧光显微镜观察表明 WTR 与 APAO 相互黏附,在沥青相中形成了均匀连续的网状结构,且 APAO 能增进 WTR 的分散程度,改善 WTR 与沥青相的相容性。由此可知,APAO 的加入能够有效弥补单独废胶粉改性沥青的不足,这对废胶粉改性沥青的进一步推广运用具有重要意义。

(6)由于本文尚未对 WTR/APAO 复合改性沥青的改性机理进行深入研究,因此,下一步需对其改性机理进行分析,为 WTR/APAO 复合改性沥青后续研究及工程应用提供理论指导。

参考文献:

References:

[1] 杨志峰,李美江,王旭东,等.废旧橡胶粉在道路工程

中应用的历史和现状[J].公路交通科技,2005,22(7):19-22.

YANG Zhi-feng, LI Mei-jiang, WANG Xu-dong, et al. The history and status quo of rubber powder used in road building[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(7):19-22.

[2] LO PRESTI D. Recycled tire rubber modified bitumen's for road asphalt mixtures: A literature review[J]. Construction and Building Materials, 2013, 49:863-881.

[3] LEE S L, AKISETTY C K, AMIRKHANIAN S N. Recycling of laboratory-prepared long-term aged binders containing crumb rubber modifier[J]. Construction and Building Materials, 2008, 22(9):1906-1913.

[4] WANG Shi-feng, WANG Qiang, WU Xiao-yu, et al. Asphalt modified by thermoplastic elastomer based on recycled rubber[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93:678-684.

[5] XIAO F P, AMIRKHANIAN S N, SHEN J N, et al. Influences of crumb rubber size and type on reclaimed asphalt pavement (RAP) mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(2):1028-1034.

[6] SHARMA, GOYAL S. Comparative study of performance of natural fibers and crumb rubber modified stone matrix asphalt mixtures[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(2):134-139.

[7] 马 磊,毛雪松.中国道路工程学术研究综述·2013[J].中国公路学报,2013,26(3):1-36.

MA Biao, MAO Xue-song. Review on China's road engineering research: 2013[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3):1-36.

[8] MACLEOD D, HO S, WIETH R, et al. Study of crumb rubber materials as paving asphalt modified[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(10):1276-1288.

[9] 汪水银,郭朝阳,彭 锋.废胎胶粉沥青的改性机理[J].长安大学学报:自然科学版,2010,30(4):34-38.

WANG Shui-yin, GUO Chao-yang, PENG Feng. Research on modified mechanism of asphalt with crumb tire rubber[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(4):34-38.

[10] 刘 薇,张季男.废胶粉改性沥青存储稳定性试验研究[J].石油沥青,2014,28(1):31-35.

LIU Wei, ZHANG Ji-nan. Experimental study on storage stability of crumb rubber modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 2014, 28(1):31-35.

[11] RAHMAN M M, AIREY G D, COLLOP A C. Moisture susceptibility of high and low compaction dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures[J].

- Transportation Research Record, 2010(2180): 121-129.
- [12] RAGAB M, ABDELRAHMAN M. Performance enhancement of crumb rubber-modified asphalts through control of the developed internal network structure[J]. Transportation Research Record, 2013(2371): 96-104.
- [13] LIU Shu-tang, CAO Wei-dong, FANG Jian-guo, et al. Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2701-2708.
- [14] 沈金安, 李福晋, 李舜范. APAO 改性沥青试验研究[J]. 公路, 1997(4): 27-32.
- SHEN Jin-an, LI Fu-jin, Li Shun-fan. Experimental research on modified asphalt by APAO[J]. Highway, 1994(4): 27-32.
- [15] 孔令云, 周进川, 李卫. APAO 改性沥青试验研究[J]. 公路交通技术, 2005(5): 63-67, 107.
- KONG Ling-yun, ZHOU Jin-chuan, LI Wei. Experimental research on APAO modified asphalt[J]. Technology of Highway and Transport, 2005(5): 63-67, 107.
- [16] WEI Jian-ming, LI Yan-an, DONG Fu-qiang, et al. Study on the amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66: 105-112.
- [17] 董如何, 肖必华, 方永水. 正交试验设计的理论分析方法及应用[J]. 安徽建筑工业学院学报: 自然科学版, 2004, 12(6): 103-106.
- DONG Ru-he, XIAO Bi-hua, FANG Yong-shui. The theoretical analysis of orthogonal test design[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry, 2004, 12(6): 103-106.
- [18] ZHA F B, NOON C E. Shortest path algorithms: an evolution using real road networks[J]. Transportation Science, 1998, 32(1): 65-73.
- [19] 陈丽. 废塑料-橡胶粉复合改性沥青混合料试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
- CHEN Li. Test research on waste plastics and crumb rubber composite modified asphalt mixtures [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [20] WEI Jian-ming, LIU Zhang-yong, ZHANG Yu-zhen. Rheological properties of amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 533-539.
- [21] 高川. 橡胶沥青混合料疲劳性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
- GAO Chuan. Research on fatigue performance of asphalt rubber mixture[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
- [22] 包双雁. SBS 改性沥青技术性能和质量评价指标的研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2007.
- BAO Shuang-yan. The research on SBS modified asphalt performance and evaluating indicator [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2007.
- [23] 张争奇, 张登良. 改性沥青影响因素的探讨[J]. 石油沥青, 1998, 12(1): 33-41.
- ZHANG Zheng-qi, ZHANG Deng-liang. Factors influencing performance of polymer modified asphalt [J]. Petroleum Asphalt, 1998, 12(1): 33-41.
- [24] 熊萍, 郝培文, 高传明. SBS 聚合物改性沥青技术性能[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(1): 10-14, 19.
- XIONG Ping, HAO Per-wen, GAO Chuan-ming. Pavement performance of SBS modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(1): 11-14, 19.
- [25] 牛冬瑜, 韩森, 陈凯, 等. 加工工艺关键参数对 SBS 改性沥青性能影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2014, 34(3): 7-16.
- NIU Dong-yu, HAN Sen, CHEN Kai, et al. Study on influences of key process parameters on SBS modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2014, 34(3): 7-16.
- [26] 孙建刚. 废胶粉改性沥青的性能及机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2014.
- SUN Jian-gang. Research on performance and mechanism of waste rubber power modified asphalts[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.