

WTR/APAO 复合改性沥青混合料性能研究

尹建伟¹, 薛冰²

(1. 郑州市公路工程公司, 河南 郑州 450001; 2. 河南交院工程技术集团有限公司, 河南 郑州 450061)

摘要:【目的】将复合改性沥青应用到沥青混合料当中,改善沥青路面的路用性能,延长其使用年限,提高服务水平。【方法】对 70[#] 沥青、SBS 改性沥青、15% WTR 沥青、12% WTR+4% APAO 沥青及 15% WTR+4% APAO 沥青的 AC-13C 沥青混合料进行配合比设计;对上述 5 种不同沥青的 AC-13C 沥青混合料分别进行高温抗车辙、低温抗裂性、抗水损害、常温回弹模量及抗疲劳性能试验。【结果】上述 5 种沥青混合料的最佳油石比分别为 4.6%、5.0%、5.1%、5.1% 和 5.3%;15% WTR+4% APAO 复合改性沥青混合料的高温、水稳定及抗疲劳性能最优,12% WTR+4% APAO 复合改性沥青混合料的 25℃ 抗变形能力最优,SBS 改性沥青混合料的低温抗开裂性能最优。【结论】WTR/APAO 复合改性沥青混合料具有良好的路用性能,适合高等级沥青路面的铺设。

关键词: 废胶粉; APAO; 矿料级配; 油石比; 沥青混合料; 路用性能

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

Study on performance of WTR/APAO composite modified asphalt mixture

YIN Jian-wei¹, XUE Bing²

(1. Zhengzhou City Highway Engineering Company, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Jiaoyuan Engineering Technology Group Co., Ltd., Zhengzhou 450061, China)

Abstract: [Purposes] The composite modified asphalt was applied to asphalt mixture to improve the road performance of asphalt pavement, prolong its service life and enhance its service level. [Methods] The mix proportion of AC-13C asphalt mixture of 70[#] asphalt, SBS modified asphalt, 15% WTR asphalt, 12% WTR+4% APAO asphalt and 15% WTR+4% APAO asphalt was designed. AC-13C asphalt mixtures of above five different asphalts were tested for high-temperature rutting resistance, low-temperature crack resistance, water damage resistance, normal-temperature resilience modulus and fatigue resistance. [Findings] The best oil-stone ratios of the five asphalt mixtures are 4.6%, 5.0%, 5.1%, 5.1% and 5.3%, respectively. 15% WTR+4% APAO composite modified asphalt mixture has the best performance of high-temperature, water stability and fatigue resistance, 12% WTR+4% APAO composite modified asphalt mixture has the best 25℃ deformation resistance, and SBS modified asphalt mixture has the best low-temperature crack-ing resistance. [Conclusions] WTR/APAO composite modified asphalt mixture has good road performance and is suitable for high-grade asphalt pavement.

Key words: waste rubber powder; APAO; aggregate gradation; oil-stone ratio; asphalt mixture; road performance

收稿日期: 2021-07-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408553); 河南省重点科技攻关计划项目(152102210033)

通信作者: 尹建伟(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事公路与桥梁施工方面的研究。E-mail: 1732675179@qq.com

投稿网址: <http://cslgxbzk.csust.edu.cn/cslgdxzbzk/home>

交通基础设施规模及服务水平是影响我国经济发展的重要因素。21 世纪以来,我国公路建设快速发展,高等级公路里程逐年增加。截至 2020 年底,我国高速公路总里程已突破 15.5 万 km。沥青路面具有较好的路用性能及后期易于养护等优点而被广泛应用,在各结构类型路面中的比例逐年大幅增加。但随着使用年限及交通量的增加,尤其超载现象的发生,早期建成的沥青路面逐渐出现大面积松散、块状裂缝以及车辙等路面病害而进入大中修阶段。为了改善沥青路面的路用性能,延缓路面病害的出现,降低后期养护成本,近年来 SBS 类聚合物及废旧轮胎胶粉(waste tire rubber powder, WTR)等改性剂被广泛应用到沥青混合料中^[1-3]。WTR 对沥青进行改性的工艺主要包括干法及湿法两种。干法是先將热骨料与 WTR 进行拌和,然后再依次加入沥青及填料;湿法是在高温下将 WTR 加入沥青并充分互融,最终得到橡胶改性沥青。湿法得到的混合料的性能较干法更加稳定而被广泛采用^[4]。但 WTR 改性沥青存在不易储存、易离析的问题,增加了沥青路面的施工难度,使工程质量难以保证。为使 WTR 改性沥青的性能更加稳定,近年来,国内学者基于 WTR 复合改性沥青进行了大量的探索性研究。夏玮^[5]、镇方宇^[6]均对 WTR 改性沥青的制备方法 & WTR 掺量、粒径等影响因素展开了研究,分析不同因素对 WTR 改性沥青性能的影响,确定了 WTR 的最佳掺量,同时通过工程实例分析了橡胶沥青混合料的适用性。吴中华^[7]利用分形理论及数字图像处理技术对橡胶沥青混合料的矿料级配进行优化,认为级配优化后的橡胶沥青混合料的性能优于 SBS 改性沥青的性能。张正甫等^[8]对国内外 WTR 的研究进行总结,发现 WTR 沥青在低温抗开裂、抗水损害及抗滑方面效果较好,能够延长沥青路面的使用年限。本研究选用非晶态 α -烯烃共聚物(amorphous poly alpha olefin, APAO)改性剂对 WTR 沥青进行复合改性,以期结合两者的优点对橡胶沥青混合料进行改进^[9-11]。同时,选用工程上常用的 AC-13C 矿料级配,分别对 70[#] 沥青、SBS 沥青、15% WTR 沥青、12% WTR+4% APAO 沥青、15% WTR+4% APAO 沥青 5 种混合料进行高温抗车辙、低温抗开裂、抗水损害及抗疲劳等路用性能进行试验研究,为 WTR/APAO

复合改性沥青混合料在工程上的应用提供理论依据。

1 原材料

1.1 道路石油沥青

道路石油沥青的型号为 70[#] A 级,由许昌金欧特沥青股份有限公司生产。参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关规定对沥青的基础指标进行检测,结果见表 1。

表 1 70[#] A 级道路石油沥青基础指标试验结果

Table 1 Test results of basic indexes of 70[#] A grade paving asphalt

检测项目	技术要求	试验结果
针入度(25 ℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	60~80	71
软化点/℃	≥46	52.5
延度(15 cm/min,5 ℃)/cm	≥100	126
布式黏度(135 ℃)/(Pa·s)	—	0.56

1.2 改性剂

本研究选用 WTR、APAO 两种改性剂对 70[#] A 级道路石油沥青进行改性。WTR 为国产废旧轮胎胶粉,80 目筛孔分计筛余 8.5%,主要成分的质量占比分别为:灰分 6.9%,炭黑 31.3%,橡胶烃 46.8%,金属 0.04%,此外,加热损失了 7.8%;APAO 由美国亨斯迈公司生产,密度为 1.4 g/cm³,熔点为 295 ℃,属于非晶态 α -烯烃热塑性树脂类 2385 型改性剂。两种改性剂的外观如图 1 所示。

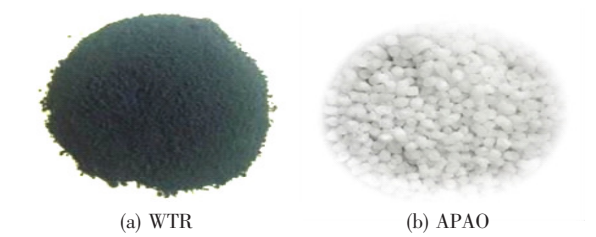


图 1 两种改性剂的外观

Fig. 1 Appearance of the two modifiers

1.3 改性沥青

改性沥青为 SBS I-D 聚合物改性沥青,由许昌金欧特沥青股份有限公司生产,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的相关规定对沥青的基础指标进行检测,结果见表 2。

表 2 SBS I-D 聚合物改性沥青基础指标试验结果

Table 2 Test results of basic indexes of SBS I-D polymer modified asphalt

检测项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	40~60	51
软化点/℃	≥60	68.5
延度(5 cm/min,5℃)/cm	≥20	26
弹性恢复(25℃)/%	≥75	88
布式黏度(135℃)/(Pa·s)	≤3	2.32

1.4 WTR/APAO 改性沥青

相关研究表明,当 WTR 的掺量为 15%时,WTR 沥青的路用性能最优。此外,12% WTR+4%APAO 及 15% WTR+4%APAO 两种复合改性沥青的性能较优异^[12]。WTR/APAO 复合改性沥青的加工流程如图 2 所示。参照《橡胶沥青路面技术规范》(DG/TJ08—2109—2012)对 WTR/APAO 复合改性沥青的基础指标进行检测,结果见表 3~4。

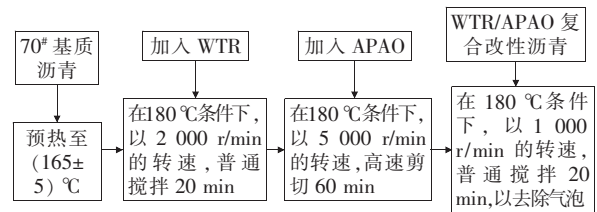


图 2 WTR/APAO 复合改性沥青加工流程

Fig. 2 Processing flow of WTR/APAO composite modified asphalt

2 配合比设计及路用性能试验

2.1 配合比设计

本研究选用 AC-13C 矿料级配展开研究。其

表 3 WTR 改性沥青基础指标试验结果

Table 3 Test results of basic indexes of WTR modified asphalt

检测项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	30~60	43
软化点/℃	≥60	78.5
延度(5 cm/min,5℃)/cm	≥5	12
弹性恢复(25℃)/%	≥60	71
布式黏度(135℃)/(Pa·s)	—	3.76

表 4 WTR/APAO 复合改性沥青基础指标试验结果

Table 4 Test results of basic indexes of WTR/APAO composite modified asphalt

检测项目	技术 要求	试验结果	
		12%WTR+ 4%APAO	15%WTR+ 4%APAO
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	30~60	41	38
软化点/℃	≥60	67.5	71.0
延度(5 cm/min,5℃)/cm	≥5	7	9
弹性恢复(25℃)/%	≥60	76	84
布式黏度(180℃)/(Pa·s)	2~5	4.08	2.31

中,粗骨料为 10~15、5~10 和 3~5 mm 的石灰岩碎石,细骨料为 0~3 mm 的石灰岩机制砂,填料为用石灰岩磨细的矿粉。粗、细骨料及矿粉的主要技术指标均满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求。AC-13C 矿料级配的设计结果见表 5。其中,关键筛孔 2.36 mm 的通过率为 36.0%,满足不大于 40%的要求。在 AC-13C 矿料级配下,70# 沥青、SBS 沥青、15% WTR 沥青、12% WTR+4% APAO 沥青、15% WTR+4%APAO 沥青 5 种沥青混合料的最佳油石比及马歇尔试验结果见表 6。

表 5 AC-13C 矿料级配设计结果

Table 5 Design results of AC-13C aggregate gradation %

混合料级配	类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率							
		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
AC-13C	上限	100.0	85.0	68.0	50.0	38.0	28.0	20.0	15.0
	下限	90.0	68.0	38.0	24.0	15.0	10.0	7.0	5.0
	设计级配	95.5	78.7	52.1	36.0	29.2	19.2	13.8	10.1

表 6 不同沥青混合料最佳油石比及马歇尔试验结果

Table 6 Optimal oil-stone ratio of different asphalt mixtures and Marshall test results

混合料类型	最佳油石比/%	毛体积相对密度	空隙率/%	矿料间隙率/%	饱和度/%	稳定度/kN	流值/mm
70# 沥青	4.6	2.441	4.97	15.20	68.5	10.02	3.2
SBS 沥青	5.0	2.435	4.73	15.40	69.3	11.87	3.1
15%WTR 沥青	5.1	2.433	4.68	15.60	70.2	11.46	2.4
12%WTR+4%APAO 沥青	5.1	2.431	4.66	15.50	70.6	13.67	2.1
15%WTR+4%APAO 沥青	5.3	2.428	4.49	5.81	71.5	11.98	2.3

2.2 高温稳定性

在夏季的高温天气里,沥青路面结构层内部的温度往往会达到 60 ℃ 以上。沥青路面是一种黏弹性结构层,因此在高温和车辆轴载的共同作用下极易出现塑性变形而形成车辙。泛油、拥包、推移及车辙等病害是沥青路面高温稳定性差的主要表现形式^[13-16]。马歇尔稳定度、蠕变以及车辙试验是评价混合料高温稳定性常用的试验方法。本研究选用 60 ℃ 室内车辙试验来评价 5 种沥青混合料的高温抗车辙能力,结果如图 3 所示。

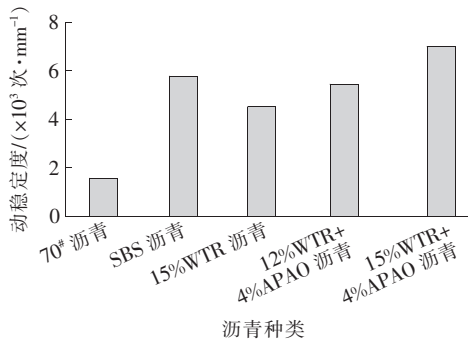


图 3 60 ℃ 室内车辙试验结果

Fig. 3 Results of indoor rutting test at 60 ℃

由图 3 可以看出,4 种改性沥青混合料 SBS、15%WTR、12% WTR+4% APAO、15% WTR+4%APAO 动稳定度的试验结果均满足“1~3 区的动稳定度不低于 2 800 次/mm”的要求,而 70# 沥青混合料的试验结果也满足“1~3 区不低于 1 000 次/mm”的要求;这 4 种改性沥青混合料动稳定度的试验结果比 70# 沥青分别提高了 2.7、1.9、2.5 和 3.5 倍,说明 WTR、APAO 两种改性剂的掺入对混合料的高温抗车辙能力有显著改善,其中 15%WTR+4% APAO 改性沥青混合料的高温性能最优。

2.3 回弹模量

回弹模量是衡量沥青路面强度的参数,也是沥青路面设计时重要的技术指标,反映了材料在弹性变形过程中应力与应变的比值关系。本研究通过美国各州公路及运输工作者协会规定的间接拉伸试验来评价混合料的强度。25 ℃ 时 5 种沥青混合料间接拉伸试验结果如图 4 所示。

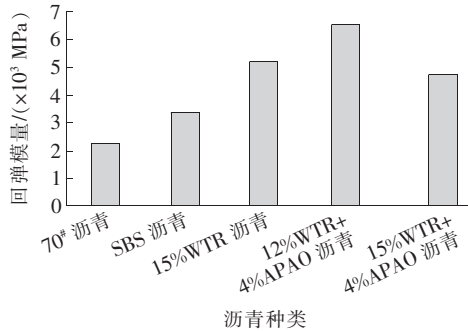


图 4 25 ℃ 间接拉伸试验结果

Fig. 4 Results of indirect tensile test at 25 ℃

由图 4 可以看出,70# 沥青的回弹模量最小,为 2 237 MPa,SBS 沥青、15% WTR 沥青、12% WTR+4% APAO 沥青和 15% WTR+4% APAO 沥青 4 种改性沥青混合料的回弹模量比 70# 沥青分别提高了 49.7%、131.2%、192.6% 和 112.1%,其中 12% WTR+4% APAO 改性沥青混合料的回弹模量最大,为 6 546 MPa。与 70# 沥青相比,SBS 沥青回弹模量的增幅不大,在试验过程中也能发现 SBS 沥青混合料承受的应力显著增大,但应变减小得不明显;但 WTR/APAO 复合改性沥青混合料承受的应力显著增大的同时,应变也显著减小,表明 WTR/APAO 复合改性沥青混合料 25 ℃ 时的抗变形能力更优。

2.4 低温抗裂性

沥青对温度较敏感,在低温环境下会变得硬

而脆。在季节性冰冻区,当气温较低,结构层内部的容许拉应力低于因温度变化而产生的温缩应力时,沥青路面就会发生开裂。这些早期轻微的裂缝如果不加以处置就会形成龟裂、块状裂缝、松散等严重病害^[17]。本研究选用-10℃低温小梁弯曲试验来评价 5 种沥青混合料的低温抗开裂性能,其弯拉强度、最大弯拉应变试验结果如图 5~6 所示。

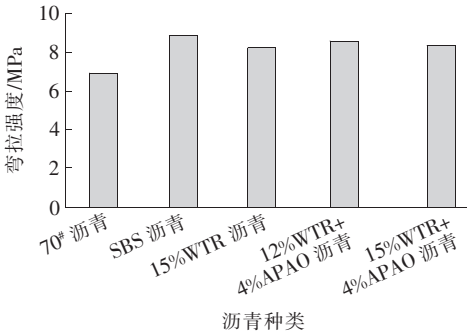


图 5 弯拉强度试验结果

Fig. 5 Test results of bending tensile strength

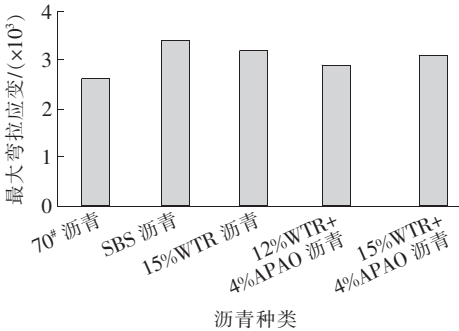


图 6 最大弯拉应变试验结果

Fig. 6 Test results of maximum bending tensile strain

由图 5~6 可以看出,与 70# 沥青相比,4 种改性沥青混合料的弯拉强度及最大弯拉应变均有所增大,其中,SBS 改性沥青增大的最多,分别比 70# 沥青提高了 28.0%和 29.4%;与掺入 WTR 改性剂的沥青混合料相比,掺入 APAO 改性剂的沥青混合料的弯拉强度更高,但最大弯拉应变却相对较小,这与 WTR/APAO 复合沥青混合料低温延度试验的结果相吻合。

2.5 水稳定性

在季节性多雨地区,水损害是沥青路面常见的病害形式。随着使用年限的增加,沥青路面在紫外线、雨水侵蚀、温缩应力及车辆轴载的共同作用下,沥青胶浆极易从骨料的间隙中脱落。松散、

坑槽等路面早期病害是沥青路面抗水损害性能差的主要表现形式^[18]。本研究选用浸水马歇尔、冻融劈裂试验来评价 5 种沥青混合料的水稳定性,试验结果如图 7~8 所示。

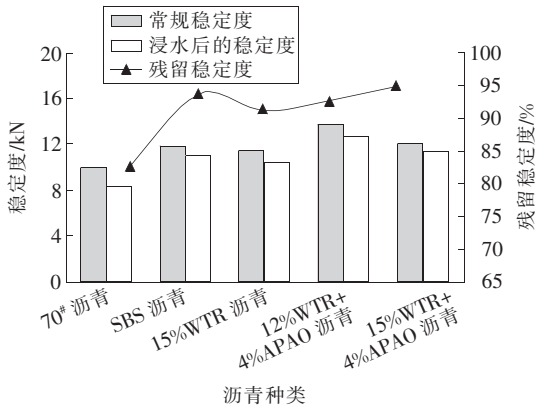


图 7 浸水马歇尔试验结果

Fig. 7 Results of immersion Marshall test

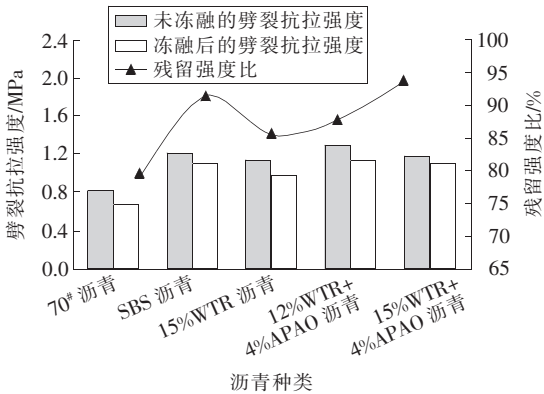


图 8 冻融劈裂试验结果

Fig. 8 Results of freeze-thaw splitting test

由图 7~8 可以看出,与 70# 沥青相比,4 种改性沥青混合料的浸水马歇尔残留稳定度及冻融劈裂残留强度比均有所增大,其中,15% WTR + 4%APAO 改性沥青增大的最明显,分别比 70# 沥青提高了 14.6%和 17.7%;WTR/APAO 复合沥青混合料的水稳定性明显优于 WTR 沥青混合料,这表明 4% APAO 的掺入对沥青混合料水稳定性能的改善有积极的作用。

2.6 疲劳性能

沥青路面在运营过程中会受到温度、雨水、紫外线及车辆轴载的综合作用,路面结构层长期处在应力、应变不断变化的环境中。当车辆轴载过大及作用次数过多时,沥青路面会因疲劳破坏而出现裂缝^[19]。本研究采用 UTM-25 疲劳试验机

对沥青混合料进行疲劳试验来评价沥青混合料的抗疲劳性能。试验所用的小梁试件的尺寸为 380 mm×50 mm×63 mm。5 种沥青混合料不同应力比时的疲劳试验结果如图 9 所示。

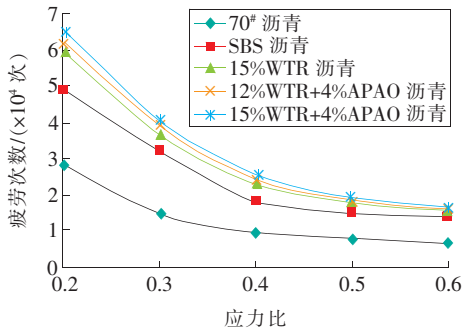


图 9 疲劳试验结果
Fig. 9 Results of fatigue test

由图 9 可以看出,随着应力比的增大,70# 沥青、SBS 沥青、15% WTR 沥青、12% WTR + 4% APAO 沥青、15% WTR + 4% APAO 沥青 5 种沥青混合料的疲劳次数均逐渐降低,但降低幅度逐渐减小;当应力比相同时,15% WTR + 4% APAO 沥青混合料的疲劳次数最大,70# 沥青混合料的疲劳次数最小,SBS 沥青混合料的疲劳次数居中。由此表明,WTR、APAO 两种改性剂的掺入使 70# 沥青混合料的疲劳次数有所增加,其中 15% WTR + 4% APAO 沥青混合料的抗疲劳性能最好。

3 结论

本研究通过对 70# 沥青、SBS 沥青、15% WTR 沥青、12% WTR + 4% APAO 沥青及 15% WTR + 4% APAO 沥青 5 种沥青混合料进行配合比设计及路用性能的研究,得出以下结论:

1) 4 种改性沥青混合料动稳定度的试验结果均比 70# 沥青混合料的大,其中 15% WTR + 4% APAO 沥青混合料的提高了 3.5 倍;4 种改性沥青混合料的抗水损害能力均优于 70# 普通沥青混合料,其中 15% WTR + 4% APAO 沥青混合料的最优;在应力比相同时,15% WTR + 4% APAO 沥青混合料的疲劳次数最大。因此,15% WTR + 4% APAO 沥青混合料较其他 4 种沥青混合料具有更优的高温抗车辙、抗水损害及抗疲劳性能。

2) 4 种改性沥青混合料的常温回弹性能、低温抗开裂性能均较 70# 沥青混合料有显著改善,其中,12% WTR + 4% APAO 复合改性沥青混合料的 25 ℃ 抗变形能力最优,SBS 沥青混合料的低温抗开裂性能最优。

〔参考文献〕

[1] 周育名,魏建国,时松,等.多聚磷酸及橡胶粉复合改性沥青性能[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):9-17.
ZHOU Yu-ming, WEI Jian-guo, SHI Song, et al. Properties of composite-modified asphalt with polyphosphoric acid and rubber powder[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018,38(5):9-17.

[2] 颜可珍,胡玥,王曾光,等.废胶粉/再生低密度聚乙烯复合改性沥青研究[J].建筑材料学报,2017,20(1):145-149.
YAN Ke-zhen, HU Yue, WANG Zeng-guang, et al. Research on modified asphalt by waste tire rubber powder and reclaimed low density polyethylene composite[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):145-149.

[3] 李智文.盐-冻融循环作用下废旧轮胎橡胶粉改性沥青混合料性能研究[J].中外公路,2021,41(3):327-332.
LI Zhi-wen. Study on performance of asphalt mixture modified by waste tire rubber powder under salt-freeze-thaw cycle[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(3):327-332.

[4] 陈智蓉.废橡塑改性沥青及混合料室内试验研究[J].石油沥青,2014,28(3):9-11.
CHEN Zhi-rong. Indoor experimental study on waste rubber plastic modified asphalt and mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2014,28(3):9-11.

[5] 夏玮.废胶粉改性沥青及沥青混合料路用性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2009:32-43.
XIA Wei. Research on the performance of asphalt-rubber and asphalt-rubber mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2009:32-43.

[6] 镇方宇.橡胶沥青混合料路用性能与施工工艺的研究[D].西安:长安大学,2014:40-42.
ZHEN Fang-yu. Research on pavement performance and construction technology of asphalt-rubber mixture[D]. Xi'an: Changan University, 2014:40-42.

- [7] 吴中华. 橡胶粉改性沥青及混合料路用性能研究[D]. 杭州:浙江大学,2013:31-44.
WU Zhong-hua. Research on the performance of rubber powder modified asphalt and the mixture [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013:31-44.
- [8] 张正甫,刘松玉,蔡光华,等. 废旧轮胎在道路工程中的研究进展[J]. 土木工程学报,2015,48(S2):361-368.
ZHANG Zheng-fu, LIU Song-yu, CAI Guang-hua, et al. Research progress of scrap tires used in road engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48 (S2):361-368.
- [9] WEI J M, LI Y A, DONG F Q, et al. Study on the amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders[J]. Construction and Building Materials, 2014, 66:105-112.
- [10] GE D D, YAN K Z, YE F Y, et al. The laboratory performance of asphalt mixture with amorphous poly alpha olefins (APAO) modified asphalt binder [J]. Construction and Building Materials, 2018, 188:676-684.
- [11] LIU N Y, YAN K Z, YOU L Y, et al. Laboratory testing on the anti-aging performance of amorphous poly alpha olefin (APAO) modified asphalt binders [J]. Construction and Building Materials, 2018, 189:460-469.
- [12] 陈明. 废胶粉/APAO复合改性沥青混合料性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2017:59-60.
CHEN Ming. Research on the properties of asphalts modified by waste rubber powder and APAO[D]. Changsha: Hunan University, 2017:59-60.
- [13] 王辉,周争辉,詹诗浩,等. 废胶粉/SBS复合改性沥青混合料 CR/SHMA-13 的级配研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(3):1-7.
WANG Hui, ZHOU Zhen-hui, ZHAN Shi-hao, et al. Study on gradation of waste crumb rubber/SBS composite modified CR/SHMA-13 asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(3):1-7.
- [14] 李志刚. DXG-1 抗车辙剂沥青混合料路用性能研究[J]. 河南科学,2020,38(8):1 264-1 269.
LI Zhi-gang. The road performance of asphalt mixture with DXG-1 anti rutting agent[J]. Henan Science, 2020, 38(8):1 264-1 269.
- [15] 冯新军,李旺,张喆. TLA+废胶粉复合改性沥青混合料路用性能研究[J]. 公路与汽运,2020(6):61-64.
FENG Xin-jun, LI Wang, ZHANG Zhe. Study on road performance of TLA+ crumb rubber composite modified asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6):61-64.
- [16] 颜鑫,郑翔南. 稳定型胶粉与 SBS 复合改性沥青及沥青混合料性能研究[J]. 公路工程,2021,46(2):195-200,233.
YAN Xin, ZHENG Xiang-nan. Study on properties of stabilized rubber powder and SBS composite modified asphalt and asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2021, 46(2):195-200,233.
- [17] 陈安京. 温拌高模量沥青混合料性能试验研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(1):33-39.
CHEN An-jing. Experimental research on the performance of warm mix high-modulus asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2021, 18(1):33-39.
- [18] 代霞. 不同工艺制备的 SBS 改性沥青混合料性能研究[J]. 公路与汽运,2020(6):53-56,60.
DAI Xia. Study on performance of SBS modified asphalt mixture prepared by different processes[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6):53-56,60.
- [19] 周彦鋆. PR. P 高模量沥青混合料的动态模量及疲劳性能研究[J]. 中外公路,2017,37(6):292-295.
ZHOU Yan-yun. Study on dynamic modulus and fatigue performance of PR. P high modulus asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(6):292-295.

(编辑 石月珍)