

基于加速加载试验的青川岩改沥青 混合料疲劳性能研究

李志¹,郝岩^{1*},袁晓曼²,庄传仪¹

(1.山东交通学院,山东 济南 250357; 2.山东省公路检测中心,山东 济宁 272007)

摘要:为评价青川岩改沥青混合料疲劳性能,该文设计了基于比例尺为1:3的路面加速加载试验系统的动轮载三点弯曲加载疲劳试验装置,对双层沥青混合料复合车辙试件进行轮胎碾压下的三点弯曲重复加载疲劳试验,结合沥青混合料小梁试件MTS弯曲疲劳试验,评价青川岩改沥青及复合改性沥青等对沥青混合料疲劳性能的改善效果。结果表明:青川岩改沥青提高了沥青混合料承受重复弯拉荷载的能力,改善了沥青混合料的抗疲劳性能,其抗疲劳性能优于青川岩沥青与SBS复合改性沥青、SBS改性沥青和基质沥青;基于比例尺为1:3的路面加速加载试验的动轮载三点弯曲重复加载疲劳试验,能更真实地模拟现场路面轮载作用,减少了小梁试件尺寸效应对疲劳寿命的影响,再现了轮载作用下路面结构的受力状况。

关键词:道路工程;疲劳性能;青川岩改沥青;加速加载试验;双层沥青混合料复合试件

中图分类号:U414

文献标志码:A

Fatigue Performance of Qingchuan Rock Modified Asphalt Mixture under Accelerated Loading Test

LI Zhi¹,HAO Yan^{1*},YUAN Xiaoman²,ZHUANG Chuanyi¹

(1.Shandong Jiaotong University,Jinan, Shandong 250357,China; 2. Shandong Highway Testing Center,Jining, Shandong 272007, China)

Abstract: To evaluate the fatigue performance of Qingchuan rock modified asphalt mixture, a dynamic wheel-load three-point bending loading fatigue test device based on an accelerated loading test system of 1 : 3 scale pavement was designed. The three-point bending repeated loading fatigue test of a composite rutting specimen of double-layer asphalt mixture under tire rolling was carried out. Through the MTS bending fatigue test of a small beam specimen of asphalt mixture, the improvement effects of Qingchuan rock modified asphalt and composite modified asphalt on the fatigue performance of the asphalt mixture were evaluated. The results show that Qingchuan rock modified asphalt can improve the ability of asphalt mixture to withstand repeated bending and tensile loads and enhance the fatigue resistance of asphalt mixture, and its fatigue resistance is better than that of Qingchuan rock asphalt, SBS composite modified asphalt, SBS modified asphalt, and base asphalt. The dynamic wheel-load three-point bending repeated loading fatigue test based on the accelerated loading test of 1 : 3 scale pavement provides a more realistic simulation of the wheel load action in the field, reduces the effect of the size effect of the small beam specimen on the fatigue life, and reproduces the force condition of the pavement structure under the wheel load action.

收稿日期:2024-03-20(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52078279);国家重点研发计划项目(编号:2018YFB1600100);山东省交通科技计划项目(编号:2016B41)

作者简介:李志,男,高级实验师.E-mail:1024453023@qq.com

*通信作者:郝岩,男,硕士研究生.E-mail:sdjthaoyan@163.com

Keywords: road engineering; fatigue performance; Qingchuan rock modified asphalt; accelerated loading test; composite specimen of double-layer asphalt mixture

0 引言

沥青层疲劳开裂是沥青路面结构设计的重要指标之一,直接影响道路的服务水平和路面的长期性能。国内外一般通过合理的路面结构组合、增加结构层厚度等延长沥青路面的使用寿命,或者使用改性沥青或耐疲劳混合料来提高沥青层的抗疲劳性能^[1-6]。青川岩沥青具有与基质沥青配伍性好、耐久性稳定等优点,可增强集料与沥青之间的黏附性,显著提高沥青路面的高温稳定性,延长路面的使用寿命^[7-13]。吴翠^[14]、申爱琴等^[15]借助MMLS3小型加速加载试验设备,对比了青川岩沥青改性沥青混合料和基质沥青、SBS改性沥青混合料的路用性能,提出青川岩沥青的掺入能够改善沥青混合料的高温稳定性和疲劳性能;杨新春等^[16]通过沥青性能分级试验,提出适当掺量的青川岩沥青能改善沥青的抗疲劳性能;李林萍等^[17]分析了青川岩沥青改性效果的适用性,提出了青川岩沥青对混合料的高温性能、疲劳性能、耐久性均有积极的帮助;林晓光等^[18]对比了布敦岩沥青与青川岩沥青,提出在相同掺量条件下,青川岩沥青对基质沥青的高温性能、低温性能及抗老化性能的改善效果均优于布敦岩沥青;李书飞等^[19]配制了不同掺量的青川岩沥青与SBS复合改性沥青混合料,验证了青川岩沥青的掺入,增强了SBS改性沥青混合料抗车辙能力和抗疲劳能力;王淋等^[20]基于表象法和耗散能理论,提出了添加5%青川岩沥青和2%SBS改性沥青的复合改性沥青具有最优的疲劳性能。

综上所述,青川岩沥青能够改善沥青混合料的抗疲劳性能。但上述室内试验受环境条件、试件尺寸、荷载频率等约束影响,均与现场路面存在较大的差异,无法真实反映轴载和环境耦合作用下沥青层内部所受的应力应变交叠状态,很难定量地评价青川岩沥青改性沥青混合料的疲劳性能。基于此,本文以MTS-810液压伺服试验机 and 比例尺为1:3的路面加速加载试验系统为基础试验平台,并成型双层沥青混合料复合车辙试件。在符合室内路用性能要求的基础上,通过小梁疲劳试验和双层沥青混合料

复合试件加速加载试验,分析破坏荷载、弯拉应变、劲度模量以及加载次数与跨中挠度的关系,全面评价青川岩改沥青混合料的疲劳性能。

1 原材料与配合比

沥青选用滨化70#A道路石油沥青和成品SBS改性沥青,通过外掺法将青川岩沥青与基质沥青和成品SBS改性沥青进行掺配,分别制成青川岩改沥青和青川岩沥青与SBS复合改性沥青。参考相关研究^[1,7,9,16],选择青川岩改沥青的掺配方案为7%青川岩沥青+基质沥青,复合改性沥青为2.5%青川岩沥青+SBS改性沥青。选用的70#A基质沥青、SBS改性沥青以及通过熔融共混法制备的青川岩改沥青和复合改性沥青性能指标结果见表1。

表1 沥青性能指标检测结果
Table 1 Asphalt performance index test results

沥青种类	软化点/ ℃	针入度/ (0.1 mm)	延度/ cm	针入度 指数
70#A 基质沥青	49.0	65	120	0.41
SBS 改性沥青	73.5	44	27	0.33
70#A+7% 岩沥青	59.5	46	30	1.22
SBS+2.5% 岩沥青	88.0	33	16	0.88

注:基质沥青延度测试温度为15℃,SBS改性沥青延度测试温度为5℃。

集料和矿粉各项技术指标见文献[1],通过马歇尔试验法进行AC-10和AC-16沥青混合料配合比设计,矿料级配见表2,最佳沥青用量分别为5.2%和4.5%。

表2 沥青混合料矿料级配
Table 2 Mineral aggregate gradation of asphalt mixture

混合料 类型	通过以下筛孔(mm)的质量百分率/%											
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
AC-10	100	100	100	99.7	63.4	37.4	26.3	18.7	13.2	10.1	6.7	
AC-16	100	90.2	83.7	78.5	46.3	29.4	21.2	15.5	11.6	8.9	6.1	

2 试验方案

采用4种不同种类的沥青分别制备沥青混合料,评价青川岩改沥青对沥青混合料路用性能的影响,

并基于加速加载试验评价青川岩沥青对沥青混合料 疲劳性能的改善效果,复合试件组合方案见表3。

表3 双层沥青混合料复合试件成型方案

Table 3 Forming scheme of composite specimen of double-layer asphalt mixture

混合料类型	厚度/ mm	试件成型方案			
		方案1	方案2	方案3	方案4
AC-10上面层	30	基质沥青	青川岩改沥青	SBS改性沥青	复合改性沥青
AC-16下面层	50	基质沥青	基质沥青	基质沥青	基质沥青

2.1 路用性能试验

为了验证掺入青川岩沥青后沥青混合料路用性能是否满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)技术要求,通过高温车辙试验、低温弯曲试验和浸水马歇尔试验评价了青川岩沥青混合料的高温性能、低温性能和水稳定性。

2.2 小梁四点弯曲疲劳试验

选择MTS-810万能材料试验机进行四点弯曲试验,按照疲劳试验成型方法制备疲劳试件,并最终切割试件尺寸为380.0 mm×63.5 mm×50.0 mm的棱柱体小梁试件,以破坏荷载、弯拉应变、劲度模量和荷载作用次数作为疲劳性能的评价指标。

2.3 复合结构试件加速加载疲劳性能试验

对成型的双层沥青混合料复合试件,其中上面层为AC-10沥青混合料,下面层为AC-16沥青混合料,如图1所示。试件成型过程中,喷洒了乳化沥青,增强了层间黏结,同时待下面层AC-16试件温度降至80℃开始碾压AC-10上面层,保证了整体性,复合试件更好地反映现场路面沥青层整体材料特性和受力状态。图2为加速加载试槽结构简图,按照三点弯曲疲劳试验方法,在加速加载试槽底部放置2块长条形铝板支座,使之形成两个支点,沿车辙试件顶部中心线施加单向循环的车轮荷载。

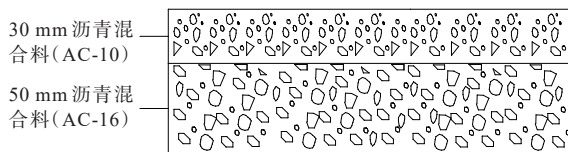


图1 复合结构试件成型示意图

Figure 1 Composite structure specimen forming

在加速加载试验机试槽中放置“30 mm上面层AC-10+50 mm下面层AC-16”双层沥青混合料复合车辙试件,试验温度为15℃,按照0.1的应力比设定加速加载试验机的轮载,在试验过程中,每隔10万

次测量车辙断面的变形量,以试件出现裂缝或跨中挠度达到15 mm作为疲劳试验的加载次数(疲劳寿命)标准。试验中,采用比例尺为1:3的路面加速加载试验系统,其结构简图见图3,该设备有效加载长度为600 mm。

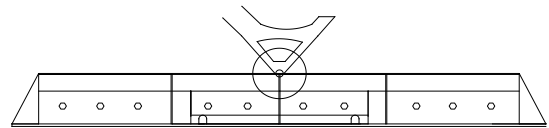


图2 加速加载试槽简图

Figure 2 Accelerated loading test groove

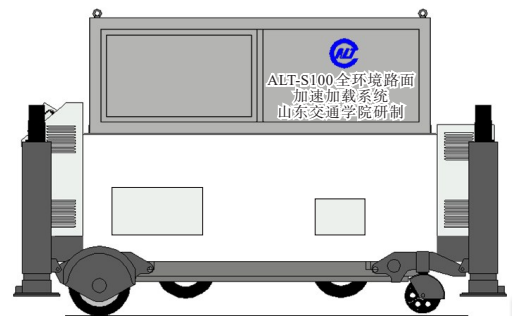


图3 比例尺为1:3的路面加速加载试验系统结构简图

Figure 3 Accelerated loading test system structure of 1:3 scale pavement

3 试验结果分析

3.1 室内路用性能试验

3.1.1 高温性能试验

高温车辙试验温度选择为60℃,轮压0.7 MPa,动稳定度结果见表4。

表4 高温车辙试验结果

Table 4 High temperature rutting test results

沥青混合料	车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm ⁻¹)
基质沥青	4.851	1 270
青川岩改沥青	3.157	1 812
SBS改性沥青	2.016	2 555
复合改性沥青	1.820	2 789

由表4可知:青川岩改沥青比基质沥青的动稳定度提高了42.7%,证明青川岩沥青能够大幅改善基质沥青的高温性能,但是其提升效果不如SBS。复合改性沥青车辙深度和动稳定度略优于SBS改性沥青,说明在SBS改性沥青中掺入青川岩沥青,对高温抗车辙性能可起到提升作用,但是不如对基质沥青的改善效果明显。

3.1.2 低温性能试验

低温弯曲试验温度选择为-10℃,采用应变控制模式,加载速率为50 mm/min,试件破坏应变结果见表5。

表5 破坏应变试验结果

Table 5 Failure strain test results

沥青混合料	破坏应变/ 10^{-6}	技术要求/ 10^{-6}
基质沥青	2 780.0	2 000
青川岩改沥青	2 545.5	2 500
SBS改性沥青	3 492.5	2 500
复合改性沥青	3 317.5	2 500

由表5可知:青川岩改沥青的弯拉破坏应变与基质沥青相比有所下降,同样复合改性沥青的破坏应变值小于SBS改性沥青,说明青川岩沥青的加入增大了沥青混合料的刚度,使基质沥青和SBS改性沥青的低温变形能力受到一定程度的影响。添加青川岩沥青后,虽然降低了沥青混合料的低温破坏应变,增加了在低温环境下出现开裂的风险,但仍满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)技术要求。

3.1.3 水稳定性试验

将双面击实75次的马歇尔试件分为两组,水浴温度为60℃,一组浸泡30 min,另一组浸泡48 h。残留稳定度为浸泡48 h与30 min的稳定度比值,4种沥青的残留稳定度结果见表6。

表6 残留稳定度试验结果

Table 6 Residual stability test results

沥青混合料	残留稳定度/%	沥青混合料	残留稳定度/%
基质沥青	87.5	SBS改性沥青	90.6
青川岩改沥青	91.7	复合改性沥青	93.2

青川岩沥青中氮元素含量较高,添加至沥青中形成的含氮官能团能够增强沥青的极性,增加沥青与集料间的黏附强度。青川岩改沥青的残留稳定度略高于SBS改性沥青,说明青川岩对于基质沥青水稳定性能的贡献程度优于SBS改性剂的。利用青川岩沥青与SBS制备复合改性沥青时,不仅能够改善沥青中的网状结构,增强沥青的内聚强度,而且这两种改性剂可以发挥各自优势,增强复合改性沥青的抗水损害能力。

3.2 梁试件四点弯曲疲劳试验

通过MTS-810液压伺服试验机,对沥青混合料棱柱体小梁试件进行应变控制模式下的三分点加载四点弯曲疲劳试验(图4),将试件放置于15℃的恒温箱5 h以上,随后测定其破坏荷载的平均值。最后,在15℃环境中以 400×10^{-6} 的拉应变水平,10 Hz的加载频率,以第50次加载模量作为初始劲度模量,试验终止条件为试件的弯曲劲度模量降低为初始模量的50%。4种沥青混合料的疲劳试验结果见表7。

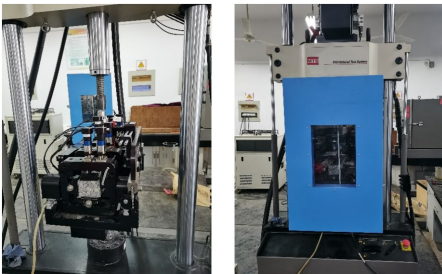


图4 四点弯曲疲劳试验示意图

Figure 4 Four-point bending fatigue test

表7 疲劳试验结果

Table 7 Fatigue test results

沥青混合料	破坏荷载/ N	弯拉应力/ MPa	开始弯拉 应变	结束弯拉 应变	开始劲度 模量/MPa	结束劲度 模量/MPa	加载次数/ 次
基质沥青	49	0.04	0.001 5	0.007 5	2.88	0.559	5 738
青川岩改沥青	64	0.06	0.001 9	0.006 8	3.18	0.805	7 059
SBS改性沥青	60	0.05	0.001 8	0.007 0	3.07	0.721	6 718
复合改性沥青	72	0.08	0.002 1	0.006 6	3.26	0.898	7 462

由四点弯曲疲劳试验结果可知:双层沥青混合料复合小梁试件疲劳破坏过程表现为3个阶段:第一阶段,试件轴向应变迅速增大,应变速率逐渐减小,逐渐产生裂纹;第二阶段,应变速率基本保持不变,应变稳定增长,裂纹持续扩展;第三阶段,应变及应变速率迅速增长,直至小梁试件发生脆性断裂。

由表7可以看出:

(1) 以破坏荷载为评价指标,复合改性沥青混合料的荷载承受能力比基质沥青混合料的提高了50%,SBS改性沥青混合料和青川岩改沥青混合料数值相差不大,但其承受荷载能力均大于基质沥青混合料的,小于复合改性沥青混合料的,说明青川岩改沥青具有更好的抵抗疲劳破坏的能力。

(2) 以开始弯拉应变和结束弯拉应变为评价指标,复合改性沥青混合料的应变增长速率小于其他3种沥青混合料,基质沥青混合料的应变增长速率明显大于青川岩改沥青混合料的,SBS改性沥青混合料的应变增长速率略大于复合改性沥青混合料的,说明青川岩改沥青可以提高沥青混合料韧性和抵抗变形的能力。

(3) 以开始劲度模量和结束劲度模量为评价指标,与基质沥青混合料相比,复合改性沥青混合料的劲度模量得到了显著提高,并且青川岩改沥青混合料劲度模量大于基质沥青混合料,说明青川岩沥青的加入可以提高混合料的劲度,改善沥青混合料的抗疲劳性能。

(4) 以荷载次数为评价指标,随着荷载作用次数的增加,小梁试件层底拉应变逐渐增大,直至发生脆性断裂。试验终止时,复合改性沥青混合料的加载次数明显大于基质沥青混合料的。与基质沥青相比,青川岩改沥青可以显著提高沥青混合料的抗疲劳性能,推迟试件产生疲劳破坏。

3.3 动轮载三点弯曲重复加载疲劳试验

按照2.3节的设置参数,对双层沥青混合料车辙试件进行重复加载,量测车辙试件跨中挠度随轮载次数的变化。为了保证试验结果的准确性,进行了3组平行试验,取3组跨中挠度平均值作为试验结果,各方案的结果汇总见图5。

由图5可以看出:在动车轮重复碾压下,双层沥青混合料复合车辙试件均发生了较大变形,至加载的末期,4种方案的跨中挠度迅速增长,均出现

了层底裂缝或断裂,发生疲劳破坏现象。在基质沥青中添加青川岩沥青后,跨中挠度的变形增长率明显下降,青川岩改沥青混合料的疲劳寿命较基质沥青的提高了67.2%,较SBS改性沥青的提高了19.3%,其疲劳寿命明显优于基质沥青混合料和SBS改性沥青混合料,表现出优异的抗疲劳性能。方案2~4在50万次加载次数内跨中挠度增长速率基本相同,但随着加载次数继续增加,SBS改性沥青混合料率先出现疲劳破坏;青川岩改沥青混合料的跨中挠度增长率略小于复合改性沥青混合料的,其次为SBS改性沥青和基质沥青,说明青川岩沥青能大幅提高基质沥青的屈服应力,青川岩改沥青混合料、复合改性沥青混合料均具有优异的抗疲劳开裂能力,采用青川岩改沥青可大幅提高沥青路面的抗疲劳性能。

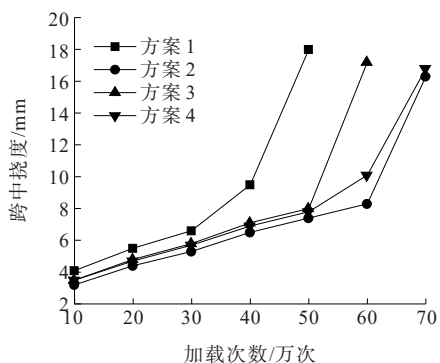


图5 跨中挠度与轮载次数

Figure 5 Mid-span deflection and wheel load times

4 结论

为评价青川岩沥青对沥青混合料疲劳性能的改善效果,对70#A基质沥青、SBS改性沥青、青川岩改性沥青和复合改性沥青4种沥青胶结料,成型4种类型的“50 mm下面层AC-16+30 mm上面层AC-10”双层沥青混合料复合试件,分别对其进行了MTS小梁试件弯曲疲劳试验和加速加载三点弯曲重复加载疲劳试验,得出以下结论:

(1) 基于沥青混合料四点弯曲疲劳试验,青川岩沥青的加入提高了沥青混合料承受弯拉重复荷载的能力,抵抗相同弯拉应力时产生的弯拉应变更小,变形的增长速率更低,同时劲度模量更大,说明岩改沥青显著改善了沥青混合料的疲劳性能。

(2) 以比例尺为1:3的路面加速加载试验系统

作为试验平台,参考三点弯曲疲劳试验原理,设计基于比例尺为1:3的路面加速加载试验系统的动轮载三点弯曲加载疲劳试验装置,提出了双层沥青混合料复合车辙试件三点弯曲重复加载疲劳试验方法,以试件底部出现裂缝或跨中挠度达到15 mm的轮载次数作为沥青层的疲劳寿命标准,以此评价沥青层疲劳性能。

(3) 在动轮载三点弯曲重复加载疲劳试验条件下,双层沥青混合料复合试件疲劳破坏特征不同于MTS四点弯曲疲劳试验,双层沥青混合料复合试件可更准确地评价沥青层的疲劳性能。从复合试件跨中挠度的变形速率可以得出不同类型沥青胶结料对沥青混合料疲劳性能贡献优劣顺序为:青川岩改沥青>复合改性沥青>SBS改性沥青>基质沥青。

疲劳试验通常采用连续正弦波加载模式,然而,路上行车轮载对沥青路面的作用并不是连续的,会存在或长或短的间歇期,由于沥青混合料自身固有的黏弹塑性特性,在加载过程中产生的疲劳损伤有可能会在间歇期内得到恢复或部分恢复。在轮载作用下间歇期会对沥青路面微裂缝或疲劳损伤带来一定程度的愈合。因此,评价沥青混合料或沥青层疲劳性能时,需进一步补充间歇式重复荷载疲劳试验或以一定行驶速度的轮碾方式进行加载,对沥青混合料或沥青结构层的疲劳性能及其衰减规律进行更深入的研究。

参考文献:

References:

- [1] 邹波,庄传仪,刘甲荣,等.基于加速加载试验的青川岩沥青改善沥青混合料高温稳定性评价[J].公路交通科技(应用技术版),2019,15(6): 13-17.
ZOU Bo,ZHUANG Chuanyi,LIU Jiarong,et al.Evaluation of Qingchuan rock asphalt improving high temperature stability of asphalt mixture based on accelerated loading test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development(Application Technology Edition), 2019, 15(6): 13-17.
- [2] 陈飞,马融.足尺路面沥青层疲劳性能试验研究[J].中外公路,2020,40(1): 42-46.
CHEN Fei, MA Rong. Experimental study on fatigue performance of asphalt layer of full-scale pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway,2020,40(1): 42-46.
- [3] WANG H, RATH P, BUTTLAR W G. Recycled asphalt shingle modified asphalt mixture design and performance evaluation[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition),2020,7(2): 205-214.
- [4] 周丹,马泽欣,刘黎萍,等.基于足尺加速加载试验的现役沥青路面疲劳特性研究[J].公路交通科技,2020,37(1): 17-24.
ZHOU Dan, MA Zexin, LIU Liping, et al. Study on fatigue performance of in-service asphalt pavement based on full-scale accelerated loading test[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 37(1): 17-24.
- [5] 杨光,王旭东.高模量沥青混凝土在半刚性基层长寿命沥青路面中应用的合理性研究[J].公路交通科技,2019,36(5):20-26,56.
YANG Guang, WANG Xudong. Study on rationality of application of high modulus asphalt concrete in long-life semi-rigid base asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(5):20-26,56.
- [6] 李亚非,方晓坤,桂启涛.基于原子力显微镜的“活化”工艺对布敦岩沥青改性沥青性能影响研究[J].中外公路,2022,42(3):215-218.
LI Yafei, FANG Xiaokun, GUI Qitao. Research on effect of “activation” process on the performance of buton rock asphalt-modified asphalt based on atomic force microscope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3):215-218.
- [7] 游鹏,杨亚平,李瑞霞.青川岩沥青改性沥青及其混合料技术性能研究[J].郑州大学学报(理学版),2017,49(3): 117-122.
YOU Peng, YANG Yaping, LI Ruixia. Research on the performance of Qingchuan rock asphalt modified asphalt binder and its mixture[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2017, 49(3):117-122.
- [8] 张井锋,安百军,陈博.岩沥青-橡胶粉复合改性沥青混合料性能试验研究[J].中外公路,2018,38(2):305-308.
ZHANG Jingfeng, AN Baijun, CHEN Bo. Test study on the performance of asphalt-rubber powder composite modified asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2): 305-308.
- [9] 陈立平,姚晓光,陈卫平.青川岩改性沥青制备工艺优化[J].公路工程,2017,42(4): 310-316.
CHEN Liping, YAO Xiaoguang, CHEN Weiping.

- Preparation process optimization of Qingchuan rock modified asphalt[J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 310-316.
- [10] 李佳庆. 蜡基温拌剂对废橡胶粉改性沥青车辙与疲劳性能的影响[J]. 中外公路, 2023, 43(5): 230-235.
- LI Jiaqing. Effect of wax-based warm mix additives on rutting and fatigue performance of waste crumb rubber modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5): 230-235.
- [11] LI R X, KARKI P, HAO P W. Fatigue and self-healing characterization of asphalt composites containing rock asphalts[J]. Construction and Building Materials, 2020, 230: 116835.
- [12] 陈凯, 何零微. 岩沥青-丁苯橡胶复合改性沥青路用性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 249-252.
- CHEN Kai, HE Qiwei. Road performance of modified and composited asphalt with buton-rock asphalt and styrene-butadiene rubber (SBR) [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 249-252.
- [13] 任瑞波, 尹利洋, 徐强, 等. RAP 掺量对温再生沥青混合料力学性能和路用性能的影响规律研究[J]. 中外公路, 2024, 44(1): 66-75.
- REN Ruibo, YIN Liyang, XU Qiang, et al. Influence of RAP content on mechanical properties and pavement performance of warm recycled asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(1): 66-75.
- [14] 吴翥. 基于加速加载试验青川岩沥青改性沥青混合料长期使用性能研究[J]. 公路工程, 2014, 39(6): 164-169.
- WU Hui. Study the long-term performance of Qingchuan rock asphalt modified asphalt mixture by MMLS3[J]. Highway Engineering, 2014, 39(6): 164-169.
- [15] 申爱琴, 郭寅川, 车飞, 等. 基于 MMLS3 试验的混合料离析对沥青路面长期高温性能的影响[J]. 中国公路学报, 2012, 25(3): 80-86.
- SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, CHE Fei, et al. Influence of asphalt mixture segregation on long-term high temperature performance of asphalt pavement based on MMLS3 test[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 80-86.
- [16] 杨新春, 刘应贵, 邓毅, 等. 青川天然岩沥青对基质沥青性能影响分析[J]. 西南公路, 2016(1): 16-19, 25.
- YANG Xinchun, LIU Yinggui, DENG Yi, et al. Analysis of influence of natural Qingchuan rock asphalt on properties of base asphalt[J]. Southwest Highway, 2016(1): 16-19, 25.
- [17] 李林萍, 程龙, 于江, 等. 岩沥青改性沥青研究分析[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 197-203.
- LI Linping, CHENG Long, YU Jiang, et al. Research on rock modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 197-203.
- [18] 林晓光, 金年生, 林立, 等. 天然岩沥青对沥青路用性能的影响研究[J]. 公路交通技术, 2015, 31(2): 45-48.
- LIN Xiaoguang, JIN Niansheng, LIN Li, et al. Research on influences of natural rock asphalt on road performances of asphalt[J]. Technology of Highway and Transport, 2015, 31(2): 45-48.
- [19] 李书飞, 徐世法, 高玉梅, 等. 岩沥青对 SBS 复合改性沥青混合料路用性能的影响评价[J]. 石油沥青, 2019, 33(1): 33-37.
- LI Shufei, XU Shifa, GAO Yumei, et al. Performance evaluation for the effect of rock asphalt on the road performance of SBS composite modified asphalt mixture [J]. Petroleum Asphalt, 2019, 33(1): 33-37.
- [20] 王淋, 郭乃胜, 温彦凯, 等. 几种改性沥青疲劳破坏评价指标及性能研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(1): 118-128.
- WANG Lin, GUO Naisheng, WEN Yankai, et al. Study on fatigue damage evaluation indexes and properties of several improved asphalts[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(1): 118-128.