文章编号：1674－2869(2026)02－0231－06

不同粒径布敦岩改性沥青的低温性能研究

王 栋[1]，郑 益[2]，李 琳[1]，胡小弟[1]，潘 攀[*1]
1.武汉工程大学土木工程与建筑学院，绿色土木工程材料与结构湖北省工程研究中心，湖北 武汉 430074；2.武汉汇科质量检测有限责任公司，湖北 武汉 430050

摘 要：为了研究不同粒径布敦岩沥青（BRA）和BRA灰分对改性沥青低温性能的影响，以5种不同粒径的BRA及BRA灰分作为研究对象，通过沥青物理性能试验、流变性能试验、四组分试验，以及沥青混合料低温弯曲小梁试验、半圆弯曲试验对比研究了不同粒径的BRA对沥青及沥青混合料低温性能的影响规律。结果表明：BRA和BRA灰分的粒径越大，改性沥青胶浆及沥青混合料的低温性能越差。当粒径相同时，BRA改性沥青中沥青质含量高于BRA灰分改性胶浆，且前者低温性能较后者更差。兼顾其低温性能和经济性，推荐BRA的最佳粒径为16.8 μm。

关键词：道路工程；布敦岩沥青；灰分；沥青混合料；低温性能
中图分类号：U414　　**文献标志码**：A　　**DOI**：10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202209015

Low-temperature properties of Buton rock-modified asphalt with different particle sizes

***WANG Dong*[1], *ZHENG Yi*[2], *LI Lin*[1], *HU Xiaodi*[1], *PAN Pan*[*1]**
1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Hubei Provincial Engineering Research Center for Green Civil Engineering Materials and Structures, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Huike Quality Testing Co., Ltd, Wuhan 430050, China

Abstract: The effects of Buton rock asphalt (BRA) and BRA ash of five different particle sizes on the low-temperature properties of asphalt and asphalt mixture were studied by the physical property test, rheological property test, four constituent chemical test, low-temperature bending test and semi-circular bending test. The findings indicated that increasing the particle sizes of BRA and BRA ash contributes to the degradation of the low-temperature properties of the modified asphalts. When the particle size of BRA is the same, the asphalt content of BRA-modified asphalt binder is more than that of the BRA ash-modified asphalt mortar, and the BRA-modified asphalt binder shows worse low-temperature properties than the BRA-modified asphalt mortar. Thus, we recommend to use the BRA with a size of 16.8 μm to prepare the BRA-modified asphalt in consideration of low-temperature properties and economy.

Keywords: road engineering; Buton rock asphalt; ash; asphalt mixture; low-temperature property

布敦岩沥青（buton rock asphalt，BRA）具有储量丰富、开采方便、价格低廉等优点，因而成为当前研究的热点之一。国内外学者针对BRA改性沥青及沥青混合料的研究表明，BRA可提高沥青的高温性能、耐老化性能[1-2]；BRA改性沥青可增强混合料的高温稳定性、抗水损性能、抗疲劳性能和抗滑性能[3-5]。然而，BRA的掺入会使改性沥青及沥青混合料的低温性能显著降低[6-7]，这严重制约

收稿日期：2022-09-13
基金项目：湖北省自然科学基金（2019CF330）；湖北省交通运输厅科技项目（2022-11-1-2）
作者简介：王 栋，硕士研究生。Email：954867892@qq.com
***通信作者**：潘 攀，博士，副教授。Email：panpan8597@126.com
引文格式：王栋，郑益，李琳，等. 不同粒径布敦岩改性沥青的低温性能研究[J]. 武汉工程大学学报，2026，48(2)：231-236.

了BRA改性沥青在道路工程中的应用。

已有研究表明,改性剂的粒径是显著影响改性沥青性能的重要因素之一[8-10]。因此,为改善BRA改性沥青的低温性能,有必要探究不同粒径的BRA与BRA灰分对改性沥青及沥青混合料低温性能的影响规律,以确定其最佳粒径范围,从而促进BRA在道路工程中的推广应用。

本文以5种粒径的BRA及BRA灰分作为研究对象,通过三大指标试验、DSR低温扫描试验以及四组分试验,对比研究了BRA及BRA灰分对沥青低温性能的影响规律及作用机理。同时,通过低温弯曲小梁试验和半圆弯曲试验研究了不同粒径的BRA对沥青混合料低温性能的影响。

1 试验部分

1.1 原材料

1.1.1 BRA及BRA灰分 本文采用的BRA产自印度尼西亚。首先将块状的BRA破碎,过筛后分别选取5.5、10.7、13.0、16.8、74.0 μm的BRA进行研究,依次命名为1-1#、1-2#、1-3#、1-4#、1-5#。

将不同粒径的BRA粉末在480~490 ℃的高温下灼烧3 min,当试样质量损失率小于0.01%/min时停止灼烧,得到的灰白色粉末即为BRA灰分。不同粒径的BRA灰分依次命名为2-1#、2-2#、2-3#、2-4#、2-5#。制备完成后的BRA灰分需密封干燥保存。BRA及BRA灰分分别如图1和图2所示。



图1 BRA

Fig. 1 Buton rock asphalt



图2 BRA灰分

Fig. 2 BRA ash

1.1.2 沥青和矿质集料 本文采用的沥青为70#基质沥青,粗集料、细集料均为石灰岩,矿粉为石灰石粉末,依据相应的规范[11-12],对其基本性能指标进行检测,均满足规范要求,结果如表1-表3所示。

表1 70#基质沥青性能指标试验结果

Table 1 Performance index test results of 70# base asphalt

测试项目	规范标准	数值
针入度(25 ℃,100 g,5 s) / 0.1 mm	60.0~80.0	71.3
15 ℃延度 / cm	≥100	> 100
软化点 / ℃	≥46	48.5

表2 粗集料性能指标试验结果

Table 2 Performance index test results of coarse aggregate

测试项目	规范标准	粗集料公称粒级 / mm		
		9.50~13.20	4.75~9.50	2.36~4.75
吸水率 / %	≤2.00	0.76	1.08	1.62
表观相对密度	≥2.60	2.854	2.815	2.869
针片状含量 / %	≤15.00	4.9	5.7	7.2
洛杉矶磨耗损失 / %	≤28.00	19.2	14.5	8.7

表3 细集料性能指标试验结果

Table 3 Performance index test results of fine aggregate

测试项目	规范标准	数值
表观相对密度	≥2.500	2.672
含泥量 / %	≤3.0	2.5
砂当量 / %	≥60.0	68
棱角性 / s	≥30.0	39.6

1.1.3 级配 本文采用级配类型为AC-13型,级配曲线见图3。采用马歇尔设计方法,确定沥青混合料的最佳油石比为4.76%。

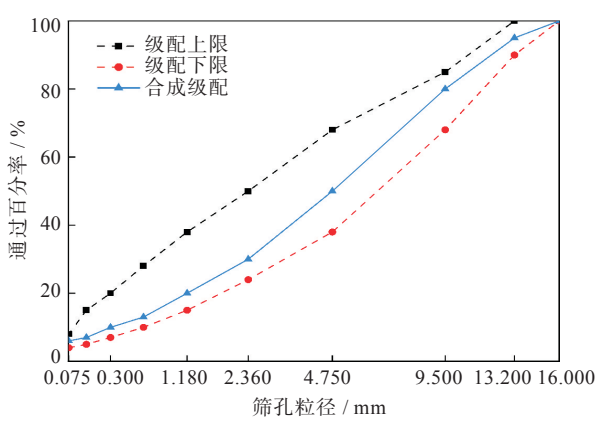


图3 AC-13型沥青混合料级配曲线

Fig. 3 Aggregate gradation of AC-13

1.2 试样制备

1.2.1 BRA改性沥青的制备 首先将70#基质沥

青加热至流淌状态（135 ℃），然后置于155 ℃的油浴锅中保温，同时掺入BRA粉末并搅拌。当BRA粉末全部添加后，通过高速剪切仪制备BRA改性沥青，剪切温度为155 ℃，剪切速率为2 500 r/min，剪切时间为40 min。将1-1#、1-2#、1-3#、1-4#、1-5#五种不同粒径BRA粉末制得的改性沥青分别命名为BRA-1、BRA-2、BRA-3、BRA-4、BRA-5。基于现有的文献研究[13-14]，选择10%、20%、30%、40%作为BRA的掺量。

1.2.2　BRA灰分沥青胶浆的制备　BRA中灰分的质量分数约占71.8%，为便于与BRA改性沥青对比，故BRA灰分的掺量依次为7%、14%、21%、28%。将2-1#、2-2#、2-3#、2-4#、2-5#5种粒径的BRA灰分所制得的改性沥青胶浆分别命名为A-1、A-2、A-3、A-4、A-5。

1.3　试验方法

1.3.1　沥青性能试验

（1）物理性能试验　对沥青的延度、针入度、软化点进行检测，其中针入度试验温度为25 ℃。延度试验温度为15 ℃，拉伸速率为5 cm/min。

（2）流变性能试验

通过动态流变剪切试验得到不同粒径的BRA改性沥青和BRA灰分沥青胶浆的复合剪切模量（G^*）和相位角（δ），采用开裂因子$G^*\cos^2\delta/\sin\delta$评价沥青的低温性能。开裂因子越小，表示其低温性能越好[14]。

（3）四组分试验

通过四组分试验可得到沥青中不同组分的质量占比，而沥青的四组分与沥青路面性能有着密切的关系。沥青中的轻质成分为饱和分和芳香分，可以使沥青变软，增强其低温延展性。沥青中的重质成分为胶质和沥青质，其中胶质可以增强沥青的黏结性、可塑性，对沥青的延展性产生积极作用。沥青质能提高沥青的黏结性和热稳定性，沥青质和胶质的含量越高，沥青就会变得越硬，软化点就越高。通过不同组分的比例研究不同粒径BRA及BRA灰分对沥青低温性能的影响。

1.3.2　沥青混合料低温性能试验

（1）低温弯曲小梁试验

首先将轮碾成型的车辙板切割成长250 mm、宽30 mm、高35 mm的棱柱体小梁试件，然后将试件放置于（−10.0±0.5）℃的保温箱中保温5 h，通过UTM-100万能试验机进行试验，加载速率为50 mm/min，记录试件破坏时的跨中挠度，采用最大弯拉应变评价沥青混合料的低温性能，最大弯拉应变越大，表示其低温性能越好[15]。

（2）半圆弯曲试验

首先采用旋转压实设备成型直径150 mm，高度50 mm的圆形试样，沿试样直径方向切割为2个半圆试样并进行切缝处理，然后将试样放置于（−10.0±0.5）℃的保温箱中保温5 h，最后以UTM-100万能试验机进行试验，加载速率为50 mm/min，记录试件破坏时的最大荷载和垂直方向总位移，采用断裂能评价沥青混合料的低温抗裂性能，断裂能越大，说明其破坏需要的能量越大，低温性能越好。

2　结果与分析

2.1　沥青性能

2.1.1　物理性能　图4为不同粒径的BRA改性沥青及BRA灰分沥青胶浆的延度试验结果。由图4可知，BRA或BRA灰分会降低基质沥青的延度。在相同掺量下，BRA改性沥青与BRA灰分沥青胶浆的延度均会随着粒径的增大而降低。在相同粒径下，BRA改性沥青和BRA灰分沥青胶浆的延度会随着掺量的增加而降低，且BRA改性沥青的延度均低于BRA灰分沥青胶浆。上述结果表明BRA和BRA灰分均会降低基质沥青的低温延展性，且相较于BRA灰分，BRA的掺入对沥青低温

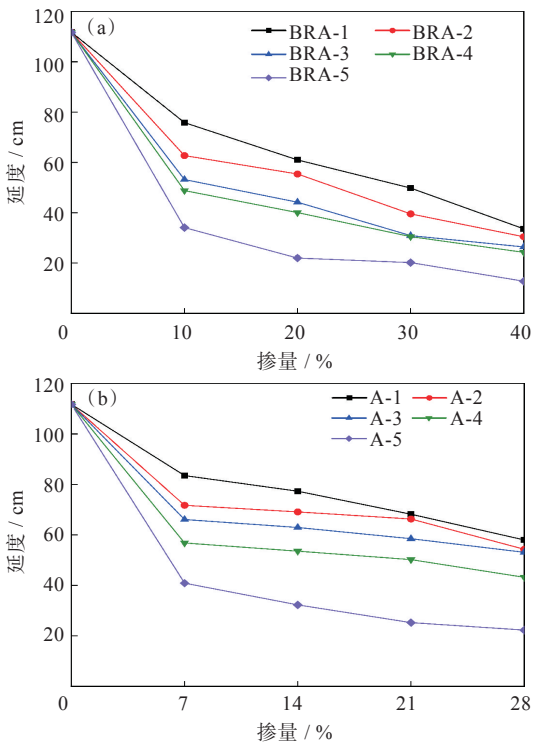


图4　15 ℃时BRA改性沥青（a）与BRA灰分沥青胶浆（b）的延度

Fig. 4　Ductility of BRA modified asphalt (a) and BRA ash asphalt mortar (b) at 15 ℃

性能的影响更大。

图5为不同粒径的BRA改性沥青及BRA灰分沥青胶浆的针入度试验结果。由图5可知，BRA或BRA灰分的掺入会降低基质沥青的针入度。在相同掺量下，BRA改性沥青或BRA灰分沥青胶浆的针入度与粒径大小之间的规律不明显，BRA-5和A-5的针入度最小。在相同粒径下，BRA改性沥青和BRA灰分沥青胶浆的针入度会随掺量的增加而降低，表明BRA与BRA灰分均会导致基质沥青的稠度增大。

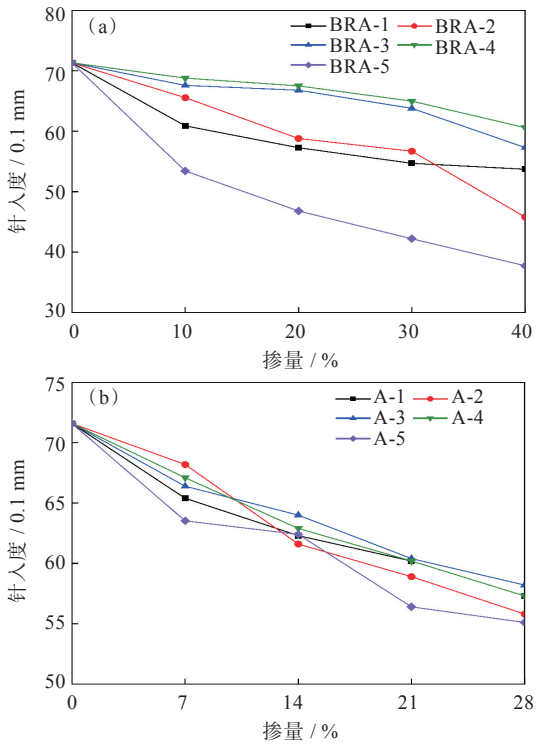


图5 25 ℃时BRA改性沥青(a)与BRA灰分沥青胶浆(b)的针入度

Fig. 5 Penetration of BRA modified asphalt (a) and BRA ash asphalt mortar (b) at 25 ℃

图6为不同粒径的BRA改性沥青及BRA灰分沥青胶浆的软化点试验结果。由图6可知，BRA及BRA灰分的掺入均会提高基质沥青的软化点。在相同掺量下，BRA改性沥青与BRA灰分沥青胶浆的软化点均会随着粒径的增大而降低。在相同粒径下，BRA改性沥青和BRA灰分沥青胶浆的软化点均随掺量的增加而增大，且BRA改性沥青的软化点均高于BRA灰分沥青胶浆。由此可知，BRA与BRA灰分粒径越小，改性沥青的高温性能越好，且相较于BRA灰分，BRA对沥青高温性能的作用更显著。

2.1.2 低温流变性能 以基质沥青、10%掺量、40%掺量的BRA-1~BRA-5和7%掺量、28%掺量

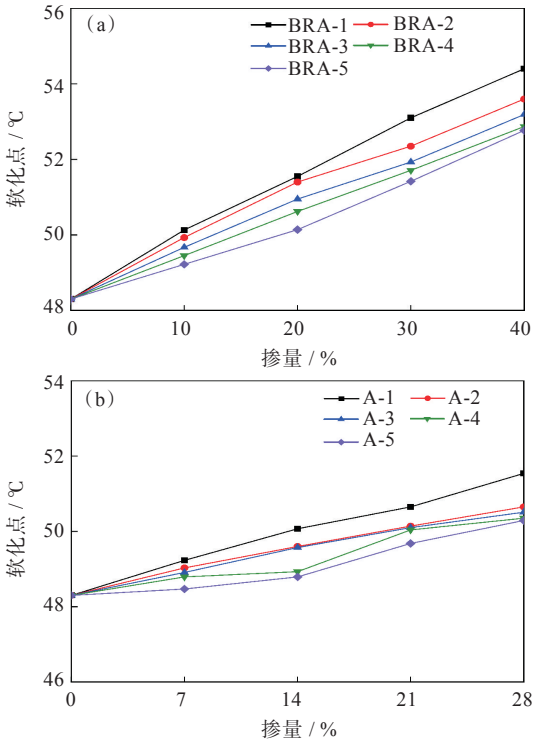


图6 BRA改性沥青(a)与BRA灰分沥青胶浆(b)的软化点

Fig. 6 Softening points of BRA modified asphalt (a) and BRA ash asphalt mortar (b)

的A-1~A-5为研究对象，测试其−10、0、10、20、30 ℃下的复数剪切模量以及相位角，并计算各个温度下的开裂因子，以评价不同粒径BRA及BRA灰分对沥青低温性能的影响。试验结果如图7所示。

由图7可知，相同温度下，BRA改性沥青与BRA灰分沥青胶浆的开裂因子均随其掺量的增加而增大，这表明BRA与BRA灰分均会降低基质沥青的低温性能；此外，在相同粒径、相同温度的条件下，BRA改性沥青的开裂因子均高于BRA灰分沥青胶浆，表明BRA对沥青低温性能的不利影响较BRA灰分更明显。

2.1.3 四组分 选取基质沥青、40%掺量的BRA-1和BRA-5、28%掺量的A-1和A-5进行四组分试验，试验结果见图8。由图8可知，BRA改性沥青与BRA灰分沥青胶浆的饱和分与芳香分含量均小于基质沥青；在相同粒径下，BRA改性沥青中的饱和分与芳香分含量均低于BRA灰分沥青胶浆，表明BRA与BRA灰分的掺入均会使基质沥青变硬，即低温性能变差，且BRA对基质沥青低温性能的不利影响更显著。

相同粒径下，BRA改性沥青的胶质含量均低于BRA灰分沥青胶浆，表明相较于BRA灰分，BRA对基质沥青低温性能的负面影响更明显。此

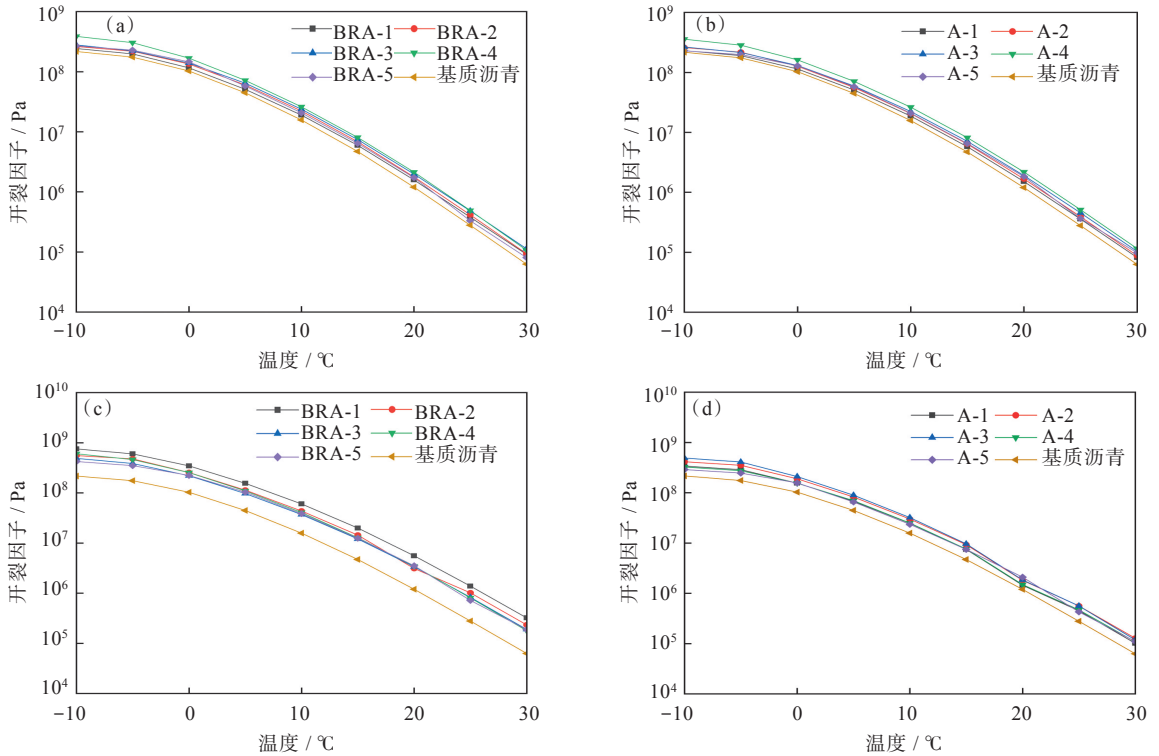


图7　BRA改性沥青与BRA灰分沥青胶浆的开裂因子：(a)10% BRA，(b)7% BRA灰分，(c)40% BRA，(d)28% BRA灰分

Fig. 7　Cracking factors of BRA modified asphalt and BRA ash asphalt mortar: (a) 10% BRA, (b) 7% BRA ash, (c) 40% BRA, (d) 28% BRA ash

外，BRA改性沥青、BRA灰分沥青胶浆的胶质含量随粒径的增大而降低，表明粒径越大，BRA改性沥青、BRA灰分沥青胶浆的低温性能越差。

由图8可知，40%掺量的BRA-1沥青质含量高于28%掺量的A-1和基质沥青的沥青质含量，40%掺量的BRA-5沥青质含量高于28%掺量的A-5和基质沥青的沥青质含量。由于BRA包含约70%的灰分和30%的沥青质，因此，在相同掺量下，BRA灰分沥青胶浆与基质沥青的沥青质含量均小于BRA改性沥青。

2.2　沥青混合料低温性能

以40%掺量BRA作为研究对象，通过低温弯曲小梁试验、半圆弯曲试验，以探究不同粒径BRA对沥青混合料低温性能的影响。将5.5、10.7、13.0、16.8、74.0 μm的BRA制得的沥青混合料，依次命名为B-1、B-2、B-3、B-4、B-5。不同粒径BRA改性沥青混合料的低温性能试验结果如图9所示。随着BRA粒径的增大，BRA改性沥青混合料的弯拉应变呈降低的趋势，表明沥青混合料的低温抗裂性随着BRA粒径的增大而降低，这与BRA对改

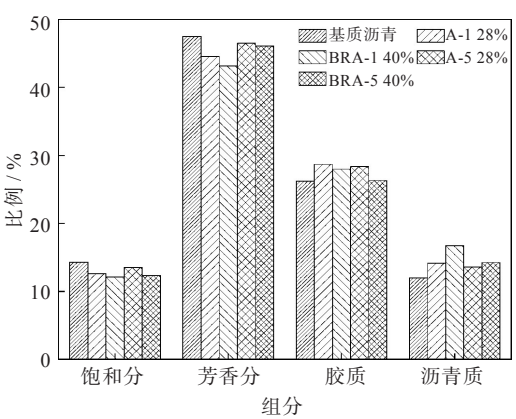


图8　四组分含量的变化

Fig. 8　Changes in four-component contents of different asphalt samples

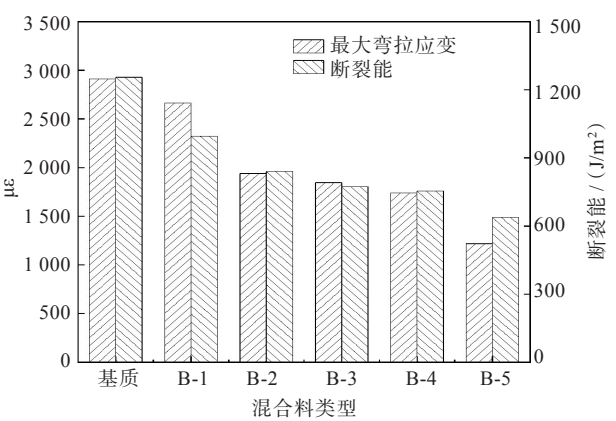


图9　沥青混合料低温性能

Fig. 9　Low- temperature performance of asphalt mixtures

性沥青低温性能的影响规律相似。相较于B-5，B-2、B-4与B-3的弯拉应变更为接近，表明B-2、B-3、B-4三种沥青混合料的低温抗裂性能较为接近，且均优于B-5。此外，BRA改性沥青混合料的断裂能均小于基质沥青，且随着BRA粒径的增大而降低。这也表明BRA的掺入会使沥青混合料的低温抗裂性变差，且BRA改性沥青混合料的低温抗裂性会随着BRA粒径的增大而降低。

3 结 语

（1）相同掺量下，BRA改性沥青和BRA灰分沥青胶浆的低温性能随粒径增大而降低，且BRA对沥青低温性能的负面作用较BRA灰分更为明显。

（2）BRA改性沥青混合料的低温性能随着BRA粒径的增大而降低，这与BRA对沥青低温性能的影响规律相似。

（3）由于BRA粒径越小，其加工成本也越高。兼顾其低温性能和经济性，推荐选择16.8 μm的BRA用于制备改性沥青及沥青混合料。

参考文献

[1] 李亚非，闫瑾，陈景. 活化“湿法”加工布敦岩沥青及沥青混合料路用性能研究[J]. 中外公路，2020，40（3）：308-311.

[2] 贾睿. 灌注式岩沥青混合料力学性能及施工技术研究[J]. 福建交通科技，2020（2）：28-30.

[3] HADIWARDOYO S P，SINAGA E S，FIKRI H. The influence of Buton asphalt additive on skid resistance based on penetration index and temperature [J]. Construction and Building Materials，2013，42：5-10.

[4] KARAMI M. Assessing the fatigue performance of Buton rock asphalt modified mixtures [J]. International Journal of Pavement Research and Technology，2020，13（5）：536-547.

[5] KARAMI M，NIKRAZ H，SEBAYANG S，et al. Laboratory experiment on resilient modulus of BRA modified asphalt mixtures [J]. International Journal of Pavement Research and Technology，2018，11（1）：38-46.

[6] MIRZAIYAN D，AMERI M，AMINI A，et al. Evaluation of the performance and temperature susceptibility of Gilsonite- and SBS-modified asphalt binders [J]. Construction and Building Materials，2019，207：679-692.

[7] YAN K Z，ZHANG M，YOU L Y，et al. Performance and optimization of castor beans-based bio-asphalt and European rock-asphalt modified asphalt binder [J]. Construction and Building Materials，2020，240：117951.

[8] 张思桐，吕秀明，肖利明. 废胎胶粉目数和加工时间对橡胶沥青性能的影响[J]. 公路交通科技（应用技术版），2016，12（10）：124-125.

[9] 涂娟，袁军，包传平，等. 废橡胶粉对SBS改性沥青的老化性能影响研究[J]. 武汉工程大学学报，2009，31（3）：19-22.

[10] 杨勇，黄鹏，周文，等. 高灰分岩沥青改性沥青混合料路用性能及其作用机理研究[J]. 公路交通科技（应用技术版），2019，15（5）：22-25.

[11] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程：JTG E20—2011[S]. 北京：人民交通出版社，2011.

[12] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程集料试验规程：JTG E42—2005[S]. 北京：人民交通出版社，2005.

[13] 朱桃. 布敦岩沥青（BRA）改性沥青结合料使用性能研究[D]. 长沙：湖南大学，2014.

[14] 李瑞霞. BRA岩沥青及其混合料技术特性研究[D]. 西安：长安大学，2010.

[15] 叶茂，胡小弟，孙权，等. 硫磺改性沥青混合料基本性能的研究[J]. 武汉工程大学学报，2017，39（4）：366-371.

本文编辑：张 瑞