

文章编号:1007-9629(2024)02-0114-07

活化胶粉复合改性沥青混合料的路用性能评价

王永宁^{1,2}, 李晓民², 杨涛³, 魏定邦², 李波^{1,*}

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司 高性能材料研究所, 甘肃 兰州 730030; 3. 甘肃省公路交通建设集团有限公司 甘肃 兰州 730030)

摘要:为评价双螺杆活化胶粉复合 SBS 改性沥青及其混合料的低温性能,用测力延度、半圆弯曲和裂缝扩展性能试验分别测试了 SBS 改性沥青、未活化胶粉复合 SBS 改性沥青和双螺杆活化胶粉复合 SBS 改性沥青的低温性能指标,并采用熵权法对测力延度指标进行优选,通过荧光显微镜和四组分试验对 3 种沥青的性能变化进行机理分析.结果表明:测力延度指标中最大屈服点可有效表征双螺杆活化胶粉复合 SBS 改性沥青的低温性能;双螺杆活化过程中交联键被打开,并与 SBS 形成稳定的交联网络结构,显著提高了改性沥青混合料的高温性能和抗水损害性能.

关键词:道路工程;双螺杆活化胶粉复合 SBS 改性沥青;力学性能;裂缝扩展性能试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.003

Evaluation of Road Performance of Activated Rubber Powder Composite Modified Asphalt Mixture

WANG Yongning^{1,2}, LI Xiaomin², YANG Tao³, WEI Dingbang², LI Bo^{1,*}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Center for High-Performance Materials Research and Development, Gansu Province Transportation Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 3. Gansu Province Transportation Construction Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China)

Abstract: To evaluate the low-temperature performance of double screw activated rubber powder composite SBS modified asphalt and its mixture, the low-temperature performance indicators of SBS modified asphalt, non-activated rubber powder composite SBS modified asphalt, and twin-screw activated rubber powder composite SBS modified asphalt were tested by force ductility, semi-circular bending, and overlay test. The entropy weight method was used to optimize the force ductility indicators. The mechanism of performance changes of the three types of asphalt was analyzed through fluorescence microscopy and four component testing. The results indicate that the maximum yield point of the force ductility index can effectively characterizes the low-temperature performance of twin-screw activated rubber powder composite SBS modified asphalt. During the twin-screw activation process, crosslinks are opened and a stable crosslink network structure is formed with SBS, significantly enhancing the high-temperature performance and resistance to water damage of the modified asphalt mixtures.

Key words: road engineering; twin-screw activated rubber powder composite SBS modified asphalt; mechanical property; overlay test

收稿日期:2023-03-14; 修订日期:2023-07-12

基金项目:甘肃省科技重大专项-企业创新联合体项目(22ZD6GA010);企业研发机构能力建设专项项目(22CX8JA091);中央引导地方科技发展资金项目(22ZY1QA005);甘肃省重点研发项目(22YF7GA135)

第一作者:王永宁(1993—),男,甘肃静宁人,兰州交通大学博士生.E-mail:1101144930@qq.com.

通讯作者:李波(1981—),男,宁夏中卫人,兰州交通大学教授,博士生导师,博士.E-mail:libo@mail.lzjtu.cn

回收胶粉因其内部复杂的网络交联结构使之与沥青不易相容^[1-2],进而导致其储存稳定性差、不易施工、加工困难等,限制了其推广应用.目前,学者们主要采用化学活化、微波活化和机械活化等手段对胶粉进行预处理,以提高其与沥青的相容性等^[3-6].但普遍认为双螺杆活化是最为理想的活化方式,因其可部分打开胶粉内部的三维网络结构,保留胶粉的部分弹性且降低交联密度,使其易与沥青融合,弥补了橡胶沥青储存稳定性差、施工和易性差、掺量低等问题^[6-7].此外,学者们采用四点疲劳弯曲试验、裂缝扩展性能试验、半圆弯曲试验和数字图像相关技术等手段对橡胶沥青混合料的力学性能进行了大量研究,认为橡胶沥青混合料具有良好的抗裂性能^[8-10].然而,目前对于活化橡胶沥青混合料的开裂研究较少,尤其对于活化胶粉复合改性后的沥青混合料开裂特性更是鲜有报导.

本文用测力延度、半圆弯曲(SCB)和裂缝扩展性能试验评价了SBS改性沥青(SBS-MA)、未活化胶粉复合SBS改性沥青(CR/SBS-MA)和双螺杆活化胶粉复合SBS改性沥青(ACR/SBS-MA)的低温性能指标,为双螺杆活化胶粉复合SBS改性沥青的推广应用提供理论与技术支持.

1 试验

1.1 原材料

采用甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司提供的镇海90#基质沥青、420 μm(40目)胶粉和1301线性SBS改性剂、糠醛抽出油和稳定剂分别制备SBS-MA、CR/SBS-MA和ACR/SBS-MA.改性沥青及活化胶粉的制备过程参考文献[11],改性沥青的技术指标见表1.根据JT/T 797—2019《路用废橡胶粉》中附录A的溶解度试验方法,测试活化胶粉的活化度为49.2%.

表1 改性沥青的技术指标

Table 1 Technical indexes of modified asphalts

Index	SBS-MA	CR/SBS-MA	ACR/SBS-MA	
SBS dosage(by mass)/%	4.5	3.0	3.0	
Rubber powder dosage(by mass)/%	0	15	15	
Penetration (25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	70	68	73	
Penetration index	0.21	3.30	2.20	
Ductility (5 °C, 5 cm·min ⁻¹)/cm	36	21	39	
Softening point/°C	87	63	91	
Residue after rotating film heating	Mass loss/% Penetration ratio	-0.08 0.80	0.10 0.83	-0.30 0.84
	Ductility (5 °C, 5 cm·min ⁻¹)/cm	26	14	27

1.2 混合料配合比设计

采用SMA-10成型沥青混合料,其级配见表2.

对级配最佳混合料的沥青含量进行了测定,确定其沥青含量为6.3%.

表2 沥青混合料的级配

Table 2 Gradation (by mass) of asphalt mixtures

Index	Sieve size/mm								
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Upper limit	100.0	100.0	60.0	32.0	26.0	22.0	18.0	16.0	13.0
Lower limit	100.0	90.0	28.0	20.0	14.0	12.0	10.0	9.0	8.0
Median limit	100.0	95.0	44.0	26.0	20.0	17.0	14.0	12.5	10.5
Selected gradation	100.0	95.9	28.1	24.5	20.3	16.9	14.0	11.9	10.9

1.3 试验方法

1.3.1 测力延度试验

采用澳大利亚IPC global公司生产的81-PV10B0研究型延度仪,按照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》浇筑延度试件,

拉伸速率为50 mm/min,水浴温度为5 °C.

1.3.2 半圆弯曲试验

采用AMPT设备引进LLD控制模式进行加载,利用LVDT位移传感器对试件底部的位移进行监测,得到加载过程中试件底部位移的变化规律.根据

文献[12],采用0.02 mm/s的LLD加载速率可以保证裂缝稳定扩展,试验温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,试件厚度为25 mm,切口长度为15 mm.

1.3.3 裂缝扩展性能试验

采用AMPT中的Overlay Tester模块评价活化胶粉复合改性沥青的抗裂性能,根据文献[13],试验最大拉伸位移为0.625 mm,加载周期为10 s(加载5 s+卸载5 s),试验温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,终止条件为载荷损失率达到93%或周期达到1 200次.

2 结果与讨论

2.1 水稳定性和高温稳定性

根据JTG E20—2011对改性沥青混合料的水稳定性和高温稳定性进行测试,结果见表3.由表3可见:ACR/SBS-MA混合料比SBS-MA、CR/SBS-MA混合料的残留稳定度比 MS_0 、抗拉强度比TSR和动稳定度DS大;与SBS-MA和CR/SBS-MA混合料相比,ACR/SBS-MA混合料的残留稳定度比分别提高了16.6%、16.4%,抗拉强度比分别提高了4.19%、10.6%,动稳定度分别提高了87.5%、100.0%.综上,ACR/SBS-MA混合料的高温性能非常突出,水稳定性性能较为突出.

表3 改性沥青混合料的水稳定性和高温稳定性
Table 3 Water stability and high temperature stability performance of modified asphalt mixtures

Index	SBS-MA	CR/SBS-MA	ACR/SBS-MA
$MS_0/\%$	89.36	89.45	104.15
TSR/%	89.23	83.40	92.89
DS/(times· mm^{-1})	4 800	4 500	9 000

2.2 测力延度试验结果分析

2.2.1 测力延度及计算指标分析

测力延度试验结果见图1.由图1可见:改性沥青的测力延度曲线均可分为3个阶段,即快速上升段、下降段和缓慢上升段;第一阶段3种沥青的特征相似;第二阶段SBS-MA和ACR/SBS-MA的特征相似,CR/SBS-MA的斜率较小;第三阶段SBS-MA和ACR/SBS-MA的特征相似,CR/SBS-MA的斜率较小;ACR/SBS-MA具有更大的位移,CR/SBS-MA位移最小.

为进一步量化分析,分别计算各项测力延度指标,结果见表4(表中 W_t 为断裂功; F_{\max} 为峰值力; L_{\max} 为最大屈服应变).由表4可见:ACR/SBS-MA的断裂功、韧性面积、韧性比均较CR/SBS-MA和SBS-MA高,说明双螺杆活化后增加了胶粉的韧性;

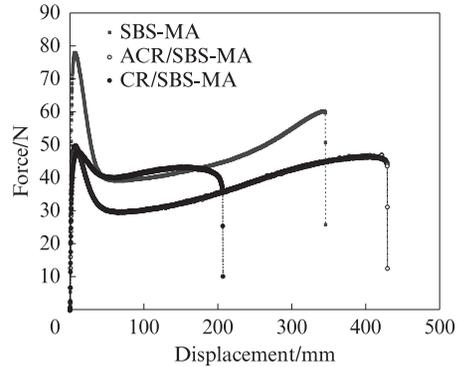


图1 测力延度试验结果

Fig. 1 Results of force-measuring ductility test

表4 测力延度试验的计算指标

Table 4 Calculated indexes of force-measuring ductility

Index	SBS-MA	CR/SBS-MA	ACR/SBS-MA
F_{\max}/N	73.04	47.95	49.74
W_t/J	13.14	8.66	16.33
L_{\max}/mm	7.13	11.67	7.48
Viscoelastic area/ ($\text{N}\cdot\text{mm}$)	0.407	0.466	0.294
Ductile area/($\text{N}\cdot\text{mm}$)	12.733	8.194	16.036
Stretch compliance/($\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$)	10.24	4.11	6.65
Yield strain energy/J	521	560	372
Toughness ratio/%	31.29	17.58	54.54

ACR/SBS-MA的黏弹性面积、屈服应变能较CR/SBS-MA和SBS-MA低,说明胶粉活化后其黏弹性降低;对比拉伸柔量和黏弹性面积可以发现,胶粉活化后拉伸柔量变小,说明胶粉活化后弹性降低.综上,胶粉活化后韧性增加,弹性降低,导致其改性沥青最大屈服应变和屈服应变能较小.

2.2.2 测力延度计算指标熵权法综合评价

前文采用多指标方式综合评判了改性沥青的低温性能,但对于多指标的离散程度尚不清晰,为此,本节采用熵权法的熵值来判断指标的离散程度.熵值越小,指标的离散程度越大,该指标对综合评价的权重就越大.具体步骤如下:

(1) 确定基本指标体系

根据前文分析,本文选择断裂功、韧性比、最大屈服应变、屈服应变能、黏弹性面积、韧性面积、拉伸柔量和峰值力这8个指标进行评价.

(2) 归一化处理

按式(1)、(2)对上述指标进行归一化处理:若指标为正,选用式(1);若指标为负,选用式(2).

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 、 x'_{ij} 分别为第*i*个样本、第*j*个指标标准化前、后的值; x_{1j}, \dots, x_{nj} 为第1, ..., *n*个样本第*j*个指标的值;*n*为样本数量.

(3)计算指标的熵和权重

第*i*个样本的第*j*个指标的比重 y_{ij} 为:

$$y_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (3)$$

第*j*个指标的信息熵 e_j 为:

$$e_j = \frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \quad (4)$$

式中: $e_j \geq 0$;若 $y_{ij}=0$,定义 $e_j=0$.

第*j*个指标的权重 w_j 为:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (5)$$

式中:*m*为指标数量.

(4)指标加权后计算得其综合评分*S*

*S*的计算式为:

$$S = \sum_{j=1}^m 100 y_{ij} w_j \quad (6)$$

测力延度熵权法评价结果见表5.由表5可见,指标权重综合评分最大的为 L_{max} ,最小的为 F_{max} .由此可见,最大屈服应变 L_{max} 能较好地表征3种改性沥青的低温性能.

表5 测力延度熵权法评价结果

Index	e_j	w_j	<i>S</i> /%
W_f	0.599	0.401	11.233
L_{max}	0.235	0.765	21.449
Toughness ratio	0.531	0.469	13.134
Yield strain energy	0.625	0.375	10.516
Viscoelastic area	0.614	0.386	10.821
Ductile area	0.598	0.402	11.262
F_{max}	0.630	0.370	10.362
Stretch compliance	0.600	0.400	11.224

2.3 半圆弯曲试验结果分析

为进一步验证 L_{max} 的测试结果,采用半圆弯曲试验对ACR/SBS-MA、SBS-MA和CR/SBS-MA混合料的低温性能进行评价,结果见图2.由图2可见:CR/SBS-MA混合料的峰值力最高,ACR/SBS-MA

混合料次之,SBS-MA混合料最小;CR/SBS-MA混合料的位移最大,SBS-MA和ACR/SBS-MA混合料相当;CR/SBS-MA混合料的力-位移面积最大.Saed等^[14]认为峰值力和力-位移面积越大,沥青混合料的低温抗裂性能越好,可见CR/SBS-MA混合料的低温抗裂性能最好.

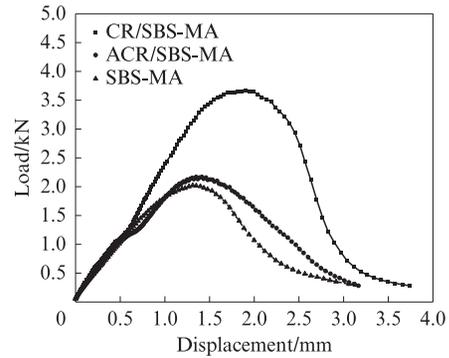


图2 半圆弯曲试验结果

Fig. 2 Results of SCB test

为进一步定量描述3种改性沥青混合料的低温抗裂性能,由半圆弯曲试验计算其断裂功 W_f 、韧性区面积 A_{lig} 、断裂能 G_f 、柔性指数 F_f 和斜率 k ,结果见表6.由表6可见,CR/SBS-MA混合料的断裂能和柔性指数最大,SBS-MA和ACR/SBS-MA混合料的断裂能和柔性指数相当.冯德成等^[12]认为断裂能越大,低温性能越好,尤其是低温抗裂性能越好.对比CR/SBS-MA与ACR/SBS-MA混合料,可以发现胶粉经双螺杆活化后对沥青低温性能有较为显著的影响,但ACR/SBS-MA混合料低温性能仍高于SBS-MA混合料.

表6 半圆弯曲试验的计算指标

Table 6 Calculated indexes of SCB test

Index	SBS-MA	CR/SBS-MA	ACR/SBS-MA
W_f /J	3.97	7.27	3.39
A_{lig} /m ²	0.00145	0.00144	0.00148
G_f /(J·m ⁻²)	2.732	5.047	2.290
<i>k</i>	1.739	2.313	1.717
F_f	15.71	21.82	13.33

2.4 裂缝扩展性能试验结果分析

Gu等^[15]认为裂缝扩展性能试验可以有效区分沥青混合料的抗裂性能,力-位移面积表示断裂功,断裂功越大,其抗裂性能越好.为了进一步论证ACR/SBS-MA混合料的低温性能,采用裂缝扩展性能试验分析了3种沥青的抗裂性能,结果见图3.由图3可见,CR/SBS-MA混合料断裂功最大,SBS-MA和ACR/SBS-MA混合料的断裂功基本相当,说明CR/SBS-MA混合料抗裂性能更好.

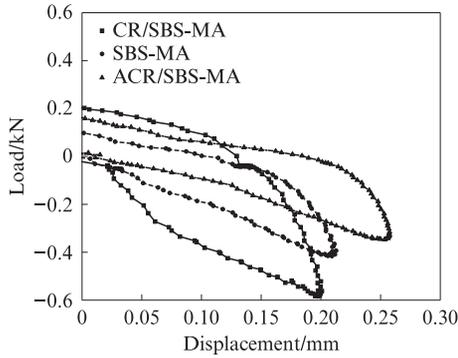


图3 裂缝扩展性能试验结果
Fig. 3 Results of overlay test

由裂缝扩展性能试验计算了改性沥青混合料的临界断裂能 G_c 、 W_f 和 A_{lig} , 结果见表7. 由表7可见, CR/SBS-MA 混合料临界断裂能最大, ACR/SBS-MA 混合料的临界断裂能比 SBS-MA 略高, 进一步说明 CR/SBS-MA 混合料具有更好的抗裂性能, ACR/SBS-MA 混合料抗裂性能略好于 SBS-MA 混合料.

表7 裂缝扩展性能试验的计算指标

Table 7 Calculated indexes of overlay test

Index	SBS-MA	CR/SBS-MA	ACR/SBS-MA
$G_c/(J \cdot m^{-2})$	84 000	121 000	86 000
A_{lig}/m^2	0.281 00	0.281 00	0.281 00
W_f/J	236.25	340.31	241.88

2.5 机理分析

2.5.1 荧光显微镜结果分析

采用荧光显微镜观察了 CR/SBS-MA、SBS-MA 和 ACR/SBS-MA 的微观结构, 结果见图4. 由图4可见: CR/SBS-MA 中 SBS 改性剂和胶粉颗粒均呈团簇状态, 且分布不均匀; SBS-MA 和 ACR/SBS-MA 中 SBS 改性剂和胶粉颗粒分散均较为均匀. 这主要是由于在高温剪切作用下, 双螺杆活化胶粉内部的交联键被破坏, 橡胶分子链不断发生断裂, 变成细小的链段, 进而均匀分散于基质沥青体系中, 形成稳定的交联网络结构, 表现出良好的高温性能.

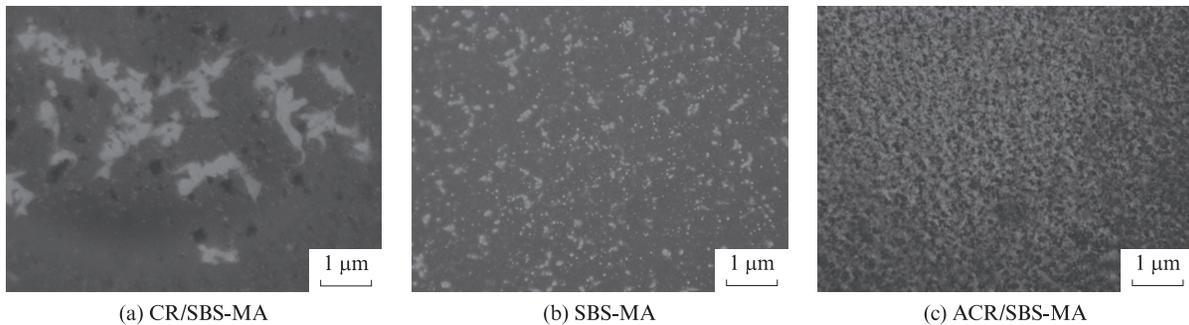


图4 荧光显微镜结果
Fig. 4 Results of fluorescence microscope

2.5.2 四组分分析

郝培文等^[16]、李添帅等^[17]认为随着沥青质和胶质含量的增加, 沥青材料的水稳定性呈衰减的趋势; 王勤劳等^[18]认为沥青质含量越高, 沥青材料的低温性能越好. 为了进一步分析 ACR/SBS-MA 的高温稳定性和水稳定性提升和低温性能下降的原因, 参照于丽梅等^[19]的四组分试验, 分析了 CR/SBS-MA、SBS-MA 和 ACR/SBS-MA 中胶质、沥青质、饱和分及芳香分的占比(质量分数), 结果见图5. 图5可见: CR/SBS-MA 的沥青质和胶质占比最大, SBS-MA 的沥青质和胶质占比次之, ACR/SBS-MA 的沥青质和胶质占比最小, ACR/SBS-MA 的水稳定性最好, 与前文研究结果一致; CR/SBS-MA 的饱和分和芳香分轻质组分占比最少^[20], 说明未活化胶粉和 SBS 更多地吸附沥青中的饱和分和芳香分, 并进行了充分的物理溶胀, 分散在沥青的连续相中, 从而提高了其低温性能.

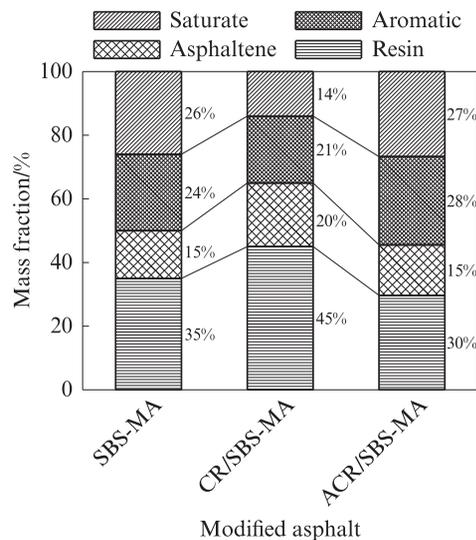


图5 四组分试验结果
Fig. 5 Results of four components test

2.6 相关性分析

对 2.2 中提出的指标——最大屈服应变 L_{max}

与断裂功 W_f 、临界断裂能 G_c 进行相关性分析,结果见图 6。由图 6 可见, L_{max} 与 W_f 、 G_c 均有很好的相关性,相关系数均在 0.99 以上,这说明测力延度

的最大屈服应变指标可以有效表征 ACR/SBS-MA、SBS-MA 和 CR/SBS-MA 的低温抗裂性能。

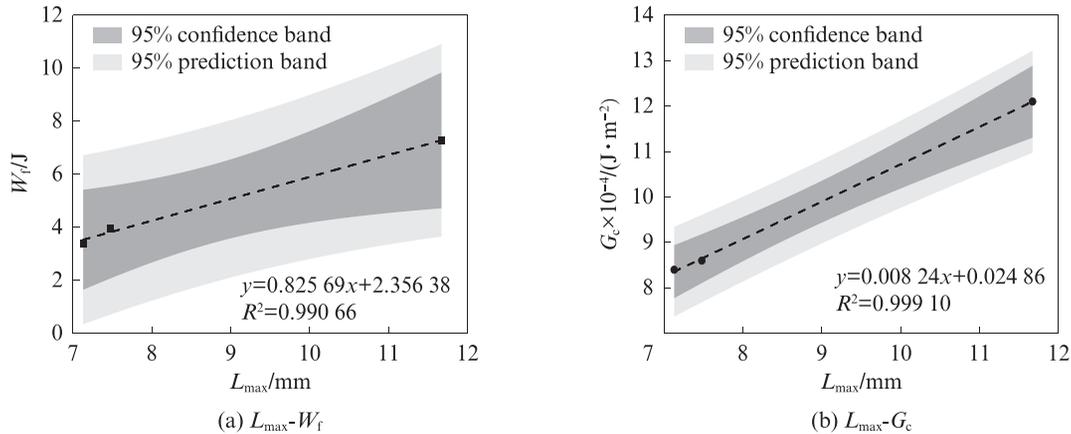


图 6 最大屈服应变与断裂能、临界断裂能的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of L_{max} and W_f , G_c

3 结论

(1) 双螺杆活化过程中打开了胶粉的部分交联键,使其与 SBS 在基质沥青中形成稳定的交联网络结构,从而使双螺杆活化胶粉复合 SBS 改性沥青混合料具有非常突出的高温和较突出的水稳定性能。

(2) 未活化胶粉和 SBS 更多地吸附沥青中的饱和分和芳香分,并进行充分的物理溶胀,进而分散在沥青的连续相中,使未活化胶粉复合 SBS 改性沥青混合料具有较为突出的低温性能。

(3) 测力延度指标中最大屈服应变可有效表征改性沥青的低温抗裂性能,且与半圆弯曲试验计算的断裂功和裂缝扩展性能试验计算的临界断裂能的相关系数均在 0.99 以上。

(4) 本文仅仅针对同一活化度的活化胶粉复合 SBS 改性沥青与未活化胶粉复合 SBS 改性沥青、SBS 改性沥青对比分析,后期将进一步研究不同活化度胶粉对其复合改性沥青低温性能的影响规律。

参考文献:

- [1] 马涛,陈蕊琳,张阳,等.胶粉应用于沥青改性技术的发展综述[J].中国公路学报,2021,34(10):1-16.
MA Tao, CHEN Conglin, ZHANG Yang, et al. Overview of the development of rubber powder application in asphalt modification technology[J]. Journal of China Highway and Transport, 2021, 34(10):1-16.(in Chinese)
- [2] 叶奋,杨思远,吴晓羽,等.深度降解橡胶改性沥青的流变性能[J].建筑材料学报,2016,19(5):945-949.
YE Fen, YANG Siyuan, WU Xiaoyu, et al. Rheological

properties of deeply degraded rubber modified asphalt[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(5):945-949.(in Chinese)

- [3] 杨永强,康秉铎,郭海东,等.活化胶粉/SBS复合改性沥青短期老化性能[J].长安大学学报(自然科学版),2021,41(5):23-33.
YANG Yongqiang, KANG Bingduo, GUO Haidong, et al. Short term aging performance of activated rubber powder/SBS composite modified asphalt[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2021, 41(5):23-33.(in Chinese)
- [4] SHI F X, LI X L, BAI Y N, et al. Mechanism of the zinc dithiocarbamate-activated rubber vulcanization process: A density functional theory study[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2021, 3(10):5188-5196.
- [5] 李波,魏永政,王宇,等.过氧化氢处理胶粉对橡胶-沥青黏弹性的影响[J].复合材料学报,2019,36(4):1008-1016.
LI Bo, WEI Yongzheng, WANG Yu, et al. Effect of hydrogen peroxide treated rubber powder on viscoelasticity of rubber asphalt [J]. Journal of Composite Materials, 2019, 36(4):1008-1016.(in Chinese)
- [6] 曾冬,徐向荣,吴俊青,等.双螺杆挤出改性胶粉/天然橡胶并用胶的性能研究[J].橡胶工业,2020,67(11):839-842.
ZENG Dong, XU Xiangrong, WU Junqing, et al. Study on properties of modified rubber powder/natural rubber blends by twin-screw extrusion [J]. Rubber Industry, 2020, 67(11):839-842.(in Chinese)
- [7] SI H, CHEN T J, ZHANG Y C. Effects of high shear stress on the devulcanization of ground tire rubber in a twin-screw extruder [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2013, 128(4):2307-2318.
- [8] YAZDANI H, KARRABIM, GHASMI I, et al. Devulcanization of waste tires using a twin-screw extruder: The effects of processing conditions [J]. Journal of Vinyl and Additive Technology, 2011, 17(1):64-69.
- [9] CUI H J, LI L H, LIU D. Research on low-temperature anti-crack performance of high modulus asphalt mixture [J].

- Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(2):37-20.
- [10] RADEEF H R, HASSAN N A, ABIDIN A, et al. Impact of ageing and moisture damage on the fracture properties of plastic waste modified asphalt[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 971(1):012009.
- [11] 文卫军. TSEP活化废旧轮胎胶粉复配SBS改性沥青的制备与性能研究[D].兰州:兰州交通大学, 2023.
- WEN Weijun. Preparation and performance study of TSEP activated waste tire rubber powder composite SBS modified asphalt[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023. (in Chinese)
- [12] 冯德成, 崔世彤, 易军艳, 等. 基于SCB试验的沥青混合料低温性能评价指标研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7):50-57.
- FENG Decheng, Cui Shitong, Yi Junyan, et al. Evaluation index of low-temperature asphalt mixture performance based on semi-circular bending test [J]. China Journal Highway and Transport, 2020, 33(7):50-57. (in Chinese)
- [13] 郝培文, 李万军, 韩钰祥, 等. 基于OT试验的乳化沥青冷再生面层混合料抗反射裂缝性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(增刊2):150-157.
- HAO Peiwen, LI Wanjun, HAN Yuxiang, et al. Crack resistance of cold recycled mixture with emulsified asphalt for surface course based on OT test[J]. Materials Reports, 2021, 35(Suppl 2): 150-157. (in Chinese)
- [14] SAED S A, KARIMI H R, RAD S M, et al. Full range I/II fracture behavior of asphalt mixtures containing RAP and rejuvenating agent using two different 3-point bend type configurations[J]. Construction and Building Materials, 2022, 314:125590.
- [15] GU F, LUO X, ZHANG Y Q, et al. Using overlay test to evaluate fracture properties of field-aged asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2015, 101:1059-1068.
- [16] 郝培文, 丁丰利, 刘策. 沥青四组分对沥青与集料黏附-黏聚性的影响[J]. 中国科技论文, 2022, 17(12):1396-1401.
- HAO Peiwen, DING Fengli, LIU Ce. Effect of four components of asphalt on adhesion and cohesion between asphalt and aggregate [J]. Chinese Science and Technology Paper, 2022, 17(12): 1396-1401. (in Chinese)
- [17] 李添帅, 陆国阳, 梁栋, 等. 聚氨酯前驱体基化学改性沥青及其改性机理[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10):45-59.
- LI Tianshuai, LU Guoyang, LIANG Dong, et al. Polyurethane precursor-based chemically modified asphalt and its modification mechanism [J]. Chinese Journal of Highway Engineering, 2021, 34(10):45-59. (in Chinese)
- [18] 王勤芳, 曾海, 田奕, 等. 浅谈基质沥青四组分组成对SBS改性沥青高低温性能影响[J]. 石油沥青, 2019, 33(6):7-13.
- WANG Qinfang, ZENG Hai, TIAN Yi, et al. Effects of four component composition of matrix asphalt on the high and low temperature performance of SBS modified asphalt[J]. Petroleum Asphalt, 2019, 33(6):7-13. (in Chinese)
- [19] 于丽梅, 陈志国. 废旧胶粉与SBS复合改性沥青稳定性分析[J]. 公路, 2019, 64(7):267-270.
- YU Limei, CHEN Zhiguo. Stability analysis of waste rubber powder and SBS composite modified asphalt[J]. Highway, 2019, 64(7):267-270. (in Chinese)