

再硫化胶粉-SBS复合改性沥青的高低温流变性能试验分析

冯浩¹,杨照东¹,冯旭冉^{2*},蔺斌¹,姚爱玲³,王康³

(1.中交一航局第五工程有限公司,河北 秦皇岛 066000;2.辽宁省交通规划设计院有限责任公司
浙江分公司,浙江 宁波 315100;3.长安大学,陕西 西安 710064)

摘要:为探究脱硫胶粉-SBS复合改性沥青中脱硫胶粉经再硫化处理后的性能恢复效果,该文以18%胶粉-2%SBS复合改性沥青为研究对象,首先通过微波裂解脱硫工艺制备脱硫胶粉-SBS复合改性沥青,在体系中添加硫化剂,成功制备了再硫化胶粉-SBS复合改性沥青。试验确定了胶粉微波裂解脱硫的最佳时间为5 min,硫磺的最佳掺量为脱硫胶粉质量的6%。对比分析了未脱硫、脱硫及再硫化胶粉-SBS 3种复合改性沥青的高、低温流变性能,结果表明:与脱硫胶粉复合改性沥青相比,再硫化胶粉复合改性沥青在高温条件下的黏弹性、变形恢复率及抗变形能力均得到显著提升;同时,其在低温环境中的抗变形能力和耐久性也得到明显改善,且各项性能指标均恢复至未脱硫胶粉-SBS复合改性沥青的水平。红外光谱分析表明,硫化剂的加入能够恢复脱硫胶粉中的C-S键以及部分恢复S-S键。研究结果证实了再硫化处理对脱硫胶粉-SBS复合改性沥青性能恢复的有效性,为相关研究和工程应用提供了理论依据和实践参考。

关键词:脱硫胶粉;微波裂解脱硫;胶粉-SBS复合改性沥青;再硫化处理;高低温流变性能
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Experimental Analysis of High- and Low-Temperature Rheological Properties of Revulcanized Rubber Powder-SBS Composite Modified Asphalt

FENG Hao¹, YANG Zhaodong¹, FENG Xuran^{2*}, LIN Bin¹, YAO Ailing³, WANG Kang³

(1. No. 5 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066000, China; 2. Zhejiang Branch, Liaoning Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315100, China;
3. Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

Abstract: This paper aims to explore the performance recovery of desulfurized rubber powder in the desulfurized rubber powder-SBS composite modified asphalt after revulcanization treatment. By using 18% rubber powder-2% SBS composite modified asphalt, a desulfurized rubber powder-SBS composite modified asphalt was first prepared via a microwave pyrolysis desulfurization process. Subsequently, a vulcanizing agent was added to the system to prepare the revulcanized rubber powder-SBS composite modified asphalt. Experiments determined the optimal microwave pyrolysis desulfurization duration for rubber powder to be 5 min, and the optimal sulfur dosage was 6% by mass of the desulfurized rubber powder. A comparative analysis of the high- and low-temperature rheological properties of three composite modified asphalts (non-desulfurized, desulfurized, and revulcanized) shows that compared to the desulfurized rubber powder composite modified asphalt, the revulcanized rubber powder composite modified asphalt exhibits significantly improved viscoelasticity, deformation recovery rate, and deformation resistance under high-temperature conditions. Meanwhile, its deformation resistance and durability in low-temperature environments are also significantly improved, with all performance indicators restored to the levels of the non-desulfurized rubber powder-SBS composite modified asphalt. Infrared spectroscopy tests indicate that the addition of the vulcanizing agent restores C-S bonds and partially restores S-S bonds in the desulfurized rubber powder. These results confirm the

收稿日期:2024-12-30 修回日期:2025-05-27

基金项目:中交第一航务工程局有限公司重点研发项目(编号:062024181)

作者简介:冯浩,男,高级工程师. E-mail:513804097@qq.com

*通信作者:冯旭冉,男,硕士,助理工程师. E-mail:598786817@qq.com

effectiveness of revulcanization treatment in recovering the performance of desulfurized rubber powder-SBS composite modified asphalt, providing a theoretical basis and practical reference for related research and engineering applications.

Keywords: desulfurized rubber powder; microwave pyrolysis desulfurization; rubber powder-SBS composite modified asphalt; revulcanization treatment; high- and low-temperature rheological property

0 引言

硫化橡胶是由线状直链高分子聚合物与硫磺等物质通过化学交联形成的三维网状结构形态的无规则高弹体。在道路中使用高掺量胶粉改性沥青时,由于胶粉在沥青中的溶胀性较差,易导致黏度过大、施工困难,因而需要对硫化橡胶进行脱硫处理^[1-4],即通过物理作用切断以硫键为主的交联点,使其内部交联键断开,降低橡胶分子量,从而提升其在沥青中的溶胀程度,改善胶粉改性沥青的施工和易性与储存稳定性,但也会导致其路用性能下降^[5-9]。

为解决脱硫胶粉性能下降的问题,本文研究了一种硫化胶囊,该胶囊在沥青混合料拌和时能够耐高温保持胶囊完整,在混合料摊铺后,通过压路机碾压作用,胶囊破壁释放出胶囊的芯材硫化剂,从而对脱硫的胶粉实现再硫化,使得脱硫胶粉-SBS复合改性沥青在保证施工性能的同时又具有优良的路用性能。受篇幅所限,本文不探讨硫化胶囊碾压破壁的相关研究,仅对掺入硫化剂的胶粉-SBS复合改性沥青的高低温流变性能进行试验和讨论。试验所用脱硫胶粉由废旧轮胎胶粉经微波裂解获得,并以此制备脱硫胶粉-SBS复合改性沥青,随后,通过向该体系添加硫化剂,制得再硫化胶粉-SBS复合改性沥青。本文研究了18%微波裂解胶粉-2%SBS复合改性沥青,及其再硫化的最佳掺量和高低温流变性能。研究结果可为高掺量胶粉改性沥青及胶粉-SBS复合改性沥青的再硫化技术提供理论依据和实践指导。

1 原材料

1.1 基质沥青

本文采用的基质沥青为A-90#道路石油沥青,经检验,其各项技术指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTGF40—2004)^[10]的要求。

1.2 改性剂

1.2.1 废旧轮胎胶粉

废旧轮胎胶粉采用40目废旧胶粉,其技术指标见表1。

表1 胶粉的技术指标

Table 1 Technical indices of rubber powder

项目	相对密度	纤维含量/%	含水率/%	胶粉烃含量/%	灰分/%
试验值	1.201	0.48	0.42	62.3	5.8
规范值	1.1~1.3	<1	<1	≥48	≤8

1.2.2 SBS

采用YH791型SBS,技术指标见表2。

表2 SBS的技术指标

Table 2 Technical indices of SBS

结构	嵌段比	拉伸强度/MPa	断裂伸长率/%
线型	30/70	23	720

1.2.3 硫化剂组成

硫化剂主要由硫磺粉、硫化活性剂氧化锌(ZnO)、硫化促进剂二乙基二硫代氨基甲酸锌(ZDC)、乙基黄原酸钾(PEX)组成。其中,硫磺粉的掺量经试验确定,其他材料组成见表3。硫化剂以外掺的方式加入复合改性沥青中,表3中数据均为占胶粉质量的比例。

表3 再硫化的硫化剂组成

Table 3 Composition of revulcanizing agent

材料名称	基本配方/%
氧化锌	5
二乙基二硫代氨基甲酸锌	0.5
乙基黄原酸钾	0.5
硫磺	X

2 脱硫胶粉-SBS复合改性沥青的制备及硫化掺量的确定

2.1 微波加热时间对脱硫胶粉-SBS复合改性沥青的影响

本文采用微波工艺对胶粉脱硫,试验使用频率为2 450 MHz、功率为800 W的家用微波炉;以微波处理时间为变量,探讨废旧轮胎胶粉的最佳脱硫工艺。具体步骤如下:首先将胶粉置于50℃的恒温烘箱中进行干燥处理;然后取30 g干燥后的胶粉,并将

其摊铺在玻璃器皿上,放入微波炉中处理一段时间后制得脱硫胶粉;再与SBS、基质沥青经高温剪切制成脱硫胶粉-SBS复合改性沥青。

本文选定的复合改性沥青的方案为:脱硫胶粉的掺量为18%,SBS的掺量为2%(均指占沥青的质量比),经反复试验,最优的脱硫胶粉-SBS复合改性沥青制作条件为:剪切温度为185℃,剪切速率为4 000 r/min,剪切时间为75 min,发育温度为180℃,发育时间为90 min。测试了不同微波加热时间下改性沥青的主要技术指标,试验结果见表4。

表4 不同的微波处理时间对胶粉改性沥青性能的影响

Table 4 Effect of different microwave treatment durations on performance of rubber powder modified asphalt

微波时间/min	180℃布氏旋转黏度/(Pa·s)	25℃针入度/(0.1 mm)	软化点/℃	5℃延度/cm	弹性恢复率/%
0	2.57	50.1	64.2	11.46	79.6
3	2.25	52.3	60.9	11.13	78.4
4	1.87	54.1	55.8	10.65	76.5
5	1.67	55.2	52.7	10.43	75.6
6	1.63	55.4	52.1	10.37	75.3

由表4可知:微波脱硫废旧胶粉改性沥青的针入度随着微波处理时间的延长逐渐增大,而软化点、延度、布氏旋转黏度、弹性恢复性能随之逐渐降低。微波时间为0~3 min时,软化点等技术指标开始变化,但变化趋势较缓,这主要是因为胶粉脱硫裂解需要吸收能量,其中S—S键和C—S键的断开温度分别为140℃和400℃。此时废旧胶粉所处的环境温度为0~160℃,不足以使沥青内的C—S键、S—S键大量断开。沥青的黏度降低的主要原因是微波的非致热效应与胶粉内部能量聚集,使得少部分C—S键、S—S键断开^[11]。当微波加热时间为3~5 min时,废旧胶粉改性沥青的软化点等指标变化较为明显,这主要是因为微波的致热作用持续,废旧胶粉内的能量不断增加,体系的温度不断上升,使胶粉内部的交联键(S—S键,C—S键)大量断裂^[11-12]。当微波时间达到5~6 min时,体系内的能量大量聚集,废旧胶粉内部温度急剧升高。能量足够强时也会引发主链(C—C键)断裂,废旧胶粉冒出少量青烟,并出现小部分碳化,致使废旧胶粉的交联程度进一步降低,改性沥青的性能下降。由此可见,胶粉脱硫的微波时间不宜超过5 min,超过5 min后,胶粉的主链结构开始破坏,并伴随有少量青烟冒出,制备过程较为危险。

2.2 硫化剂掺量对再硫化胶粉-SBS复合改性沥青性能的影响

将制备好的18%脱硫胶粉-2% SBS复合改性沥青从150℃的烘箱中取出,置于搅拌机中,再按照硫化剂配方加入3%~12%的硫磺(硫磺占脱硫胶粉的质量比)及其促进剂,在3 000 r/min的转速下搅拌15 min(不加热),制得再硫化脱硫胶粉-SBS复合改性沥青。最后将其置于试验模具中,自然冷却后测定沥青的各项参数指标,结果见图1。

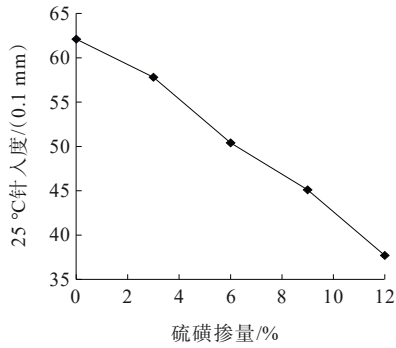
由图1可知:胶粉掺量一定时,硫化胶粉-SBS复合改性沥青的针入度随硫磺掺量的增加呈逐渐减小的趋势;软化点则逐渐增大;而沥青的5℃延度与弹性恢复率则随着硫磺掺量的增加呈先增加后降低的趋势,分别在硫磺掺量为6%与9%时达到最大值。这是因为硫磺掺量较低时,部分硫磺通过S—S键或C—S键在SBS分子链间形成交联网络,适量的交联可增强弹性,使改性沥青的各项性能得到改善;然而,过量硫磺会导致交联密度过高,分子链运动受限,材料变硬变脆,针入度变小,延展性(延度)下降;交联网络过于致密时,链段无法充分回弹,弹性恢复能力随之降低。综上,脱硫胶粉-SBS复合改性沥青中,脱硫胶粉再硫化的最佳硫磺掺量为6%。

3 再硫化脱硫胶粉-SBS复合改性沥青的流变性能

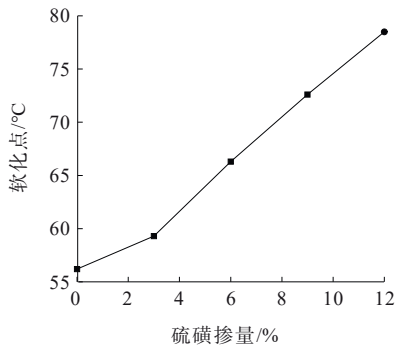
为分析高温和低温流变性能,本研究选择普通基质沥青、普通未脱硫胶粉、脱硫胶粉和脱硫后再硫化的胶粉与SBS复合改性沥青共4种方案进行比较。

3.1 高温流变性能

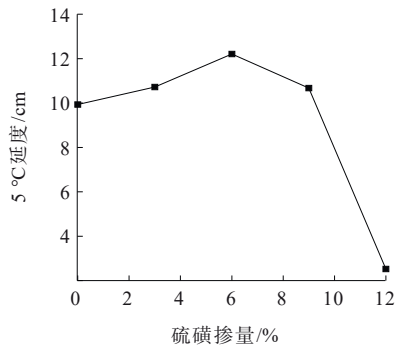
采用动态剪切流变试验(DSR)研究沥青的高温流变性能,依据规程^[13]进行试验,其评价指标为复数剪切模量 G^* ,相位角 δ ,车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 。复数剪切模量 G^* 是材料在受到剪切应力作用下的应变反应。 G^* 越大,说明在外部剪切力作用时,沥青能够更好地保持形状稳定,不易发生变形和破坏,具有更好的耐久性和承载能力^[9]。沥青相位角 δ 是指在沥青动态剪切流变测试中,沥青应变与应力之间的相位差角度^[14-15]。相位角的大小和变化趋势可以反映沥青的能量耗散特性、变形行为和流变特性,沥青相位角越大,表明材料在受到剪切应力后,变形的延迟时间更长,表现出较强的黏性特性^[14,16-17]。车辙因子 $G^*/\sin\delta$ 用来衡量沥青的黏弹特性,较大的 $G^*/\sin\delta$ 值表示沥青材料具有较高的刚性和较低的黏滞性^[18]。



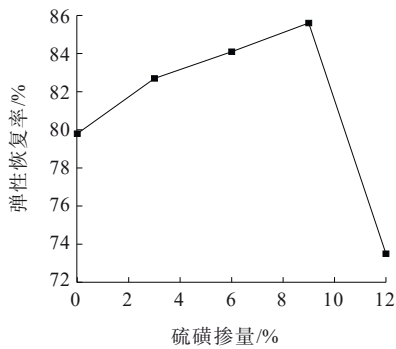
(a) 25 °C 针入度



(b) 软化点



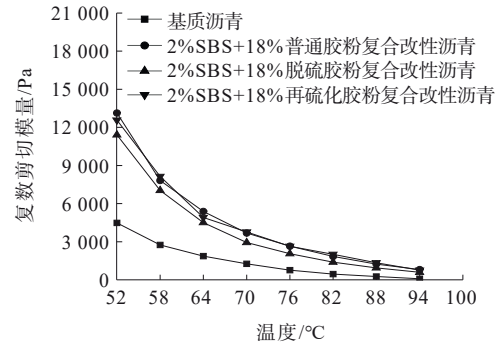
(c) 5 °C 延度



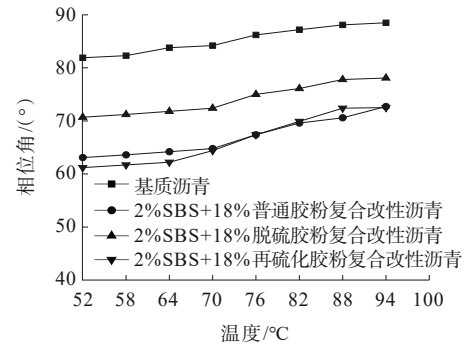
(d) 弹性恢复

图1 硫磺掺量与复合改性沥青性能之间的关系
Figure 1 Relationship between sulfur dosage and properties of composite modified asphalt

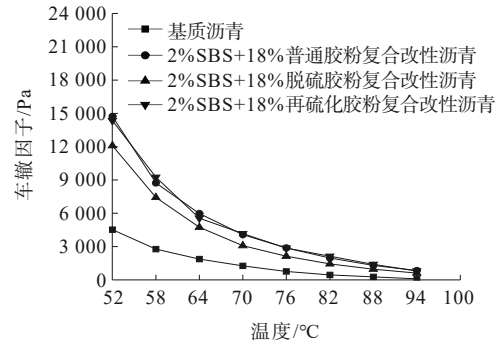
不同类型沥青的高温流变性能试验结果如图2所示。



(a) 复数剪切模量



(b) 相位角



(c) 车辙因子

图2 不同类型沥青的高温流变性能
Figure 2 High-temperature rheological properties of different types of asphalt

由图2可知:掺入SBS与胶粉可以提高沥青的复数剪切模量,其中,脱硫胶粉与SBS复合的作用效果低于普通未脱硫胶粉与SBS的复合改性,对脱硫胶粉再硫化处理后,沥青的复数剪切模量明显增大。由此可见,脱硫胶粉经再硫化处理后,硫键能够重新交联,使得沥青在高温下能够更好地保持形状稳定性,不易发生变形和破坏,具有更好的高温承载力、弹性恢复能力以及抗车辙能力。胶粉与SBS复合改性均可以提高沥青的复数剪切模量、降低沥青的相位角、提高车辙因子。脱硫处理会导致这3个指标的性能均相应变差;而脱硫胶粉改性沥青再硫化

处理后,3个指标基本恢复到未脱硫的复合改性沥青的水平。

3.2 低温流变性能

沥青低温流变性能是指沥青在低温下的流动特性和变形行为,其性能对道路的抗裂性能、耐久性能等方面都有重要影响^[19-21]。目前常采用小梁弯曲蠕变试验(BBR)研究沥青低温流变性能。通过在低温下施加弯曲应力来模拟沥青在交通荷载下的变形行为。对上述3种沥青在 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温环境下进行了BBR试验,结果见表5。

表5 不同类型沥青的低温试验数据

Table 5 Low-temperature test data of different types of asphalt

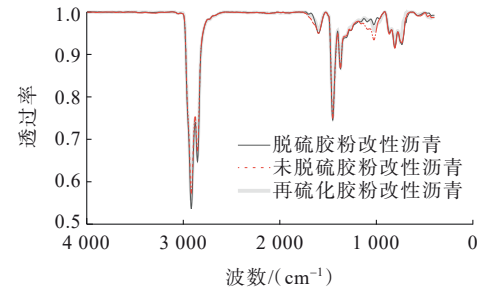
沥青类型	$-12\text{ }^{\circ}\text{C}$		$-18\text{ }^{\circ}\text{C}$		$-24\text{ }^{\circ}\text{C}$	
	蠕变劲度/MPa	蠕变速率	蠕变劲度/MPa	蠕变速率	蠕变劲度/MPa	蠕变速率
基质沥青	246	0.308	442	0.236	883	0.206
2% SBS+18% 未脱硫胶粉复合	47	0.356	84	0.303	217	0.271
2% SBS+18% 脱硫胶粉复合改性	92	0.318	194	0.278	380	0.253
2% SBS+18% 再硫化胶粉复合改性	42	0.377	88	0.312	206	0.266

由表5可知:经过胶粉与SBS的复合改性处理后,沥青的蠕变劲度显著降低,蠕变速率有一定程度的增加,可见胶粉与SBS的改性大幅度改善了其低温变形能力。改性剂掺量相同时,脱硫胶粉-SBS对沥青的复合改性效果弱于普通胶粉(未脱硫)-SBS与再硫化胶粉-SBS复合改性,而再硫化胶粉-SBS复合改性对沥青低温流变性能的改善效果与普通胶粉-SBS复合改性相近^[22-25]。由此可知,脱硫胶粉经再硫化处理后使脱硫胶粉对沥青低温性能的改善效果基本恢复至未脱硫前的水平。

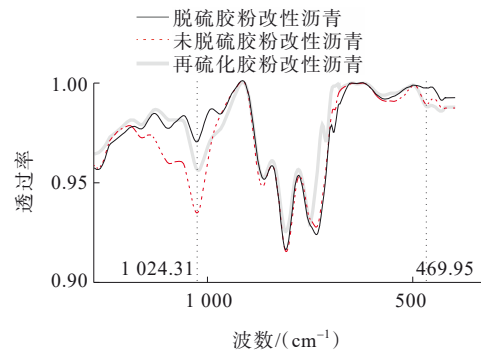
4 再硫化胶粉改性沥青的红外光谱扫描分析

利用红外光谱仪对沥青进行红外光谱扫描试验,确定沥青的组成、结构特征、官能团等信息,从而判断沥青的结构与组成以及改性剂在沥青中的作用。为了避免SBS红外光谱干扰,便于分析硫化剂对改性沥青中胶粉的再硫化效果,红外测试样品制备中均未加入SBS改性剂^[26],采用傅里叶红外光谱

仪(BRUKER TENSOR II)对未脱硫胶粉、脱硫胶粉及再硫化胶粉分别制备的胶粉改性沥青进行了红外光谱扫描,通过对比分析三者的谱图,研究再硫化剂在改性沥青中的作用,测试结果如图3所示。



(a) 红外光谱图



(b) 局部放大图

图3 胶粉改性沥青红外光谱图

Figure 3 Infrared spectrum of rubber powder modified asphalt

由图3可知:在 $1\ 024.31\text{ cm}^{-1}$ 与 469.95 cm^{-1} 两处,脱硫胶粉相对未脱硫胶粉的吸收峰值有明显降低。其中, $1\ 024.31\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为C—S键的伸缩振动, 469.95 cm^{-1} 处的吸收峰为S—S键的伸缩振动。由此可见,脱硫胶粉改性沥青的C—S键与S—S键含量相对未脱硫胶粉单独改性沥青有明显减少,表明脱硫胶粉已裂解为更小的片段结构,使其在沥青中更容易分散、溶胀。同时,脱硫胶粉改性沥青经再硫化后,与脱硫胶粉改性沥青相比,在 $1\ 020.18\text{ cm}^{-1}$ 处再硫化胶粉改性沥青的吸收峰有所升高,介于脱硫胶粉与未脱硫胶粉改性沥青之间,说明脱硫胶粉改性沥青经再硫化后,其C—S键增多,再硫化建立起交联结构,使性能一定程度恢复到未脱硫胶粉状态。在 720.05 cm^{-1} 处,再硫化胶粉改性沥青的吸收峰值高于未脱硫改性沥青,说明C—S键比未脱硫胶粉改性沥青的要更丰富,C—S交联键完全恢复,甚至更强。 469.95 cm^{-1} 处,再硫化胶粉改性沥青与

未脱硫胶粉改性沥青吸收峰的大小趋于一致,这可能是再硫化胶粉改性沥青的S—S键已基本恢复,也可能与外加剂中的硫键有关。

5 结论

(1) 随着微波脱硫时间的增加,胶粉的脱硫程度逐渐增加,但超过5 min后,胶粉脱硫程度难以继续增加,并伴随少量青烟产生,表明胶粉的主链结构已受到破坏。因此,综合考虑脱硫效果与沥青性能,微波脱硫的最佳时间为5 min。

(2) 研究表明,当硫磺掺量为6%时,再硫化胶粉-SBS复合改性沥青的延度、针入度、软化点以及弹性恢复4项关键性能指标均表现出较优水平。故推荐硫磺掺量为6%。需要注意的是,若胶粉掺量发生变化,则需通过具体试验重新确定硫磺的最佳掺量,以确保改性沥青的性能稳定。

(3) 流变性能试验研究发现,经再硫化后,18%脱硫胶粉-2% SBS复合改性沥青的车辙因子与蠕变速率有明显增加,蠕变劲度有明显降低,说明再硫化后,有助于改善胶粉-SBS复合改性沥青的高低温流变性能。

(4) 红外光谱扫描试验从微观上分析了脱硫胶粉、未脱硫胶粉、脱硫再硫化胶粉3种改性沥青的官能团,结果表明再硫化胶粉改性沥青S—S键已基本恢复至未脱硫胶粉的水平,且其C—S键更加丰富。表明再硫化处理不仅能够弥补脱硫胶粉的性能缺陷,还能从整体上恢复并提升复合改性沥青的性能。

参考文献:

References:

- [1] 赵昕,谢昆,张浩,等. 废旧胶粉沥青最优性能制备研究[J]. 应用化工, 2022, 51(12): 3586-3591.
ZHAO Xin, XIE Kun, ZHANG Hao, et al. Experimental study on the optimal performance preparation method of waste rubber powder asphalt[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(12): 3586-3591.
- [2] 杨三强,周晓雨,闰明涛,等. 废旧胶粉掺量对改性沥青溶胀机理的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4): 17-22.
YANG Sanqiang, ZHOU Xiaoyu, RUN Mingtao, et al. Microscopic characteristics of rubber modified asphalt in different rubber powder content[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(4): 17-22.
- [3] 冯新军,戴子建. 胶粉表面功能化减少胶粉改性沥青离析的研究[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 221-226.
FENG Xinjun, DAI Zijian. Surface functionalization of rubber particles to reduce phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 221-226.
- [4] 王寒冰,王仕峰. 高掺量橡胶沥青技术发展探讨[J]. 中国胶粘剂, 2024, 33(1): 57-62, 70.
WANG Hanbing, WANG Shifeng. Development and discussion of high-content rubberized asphalt technology[J]. China Adhesives, 2024, 33(1): 57-62, 70.
- [5] 李波,王静,曹贵,等. 废旧胶粉特性对橡胶沥青高温性能的影响机理[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(2): 347-355.
LI Bo, WANG Jing, CAO Gui, et al. Influence mechanism of crumb rubber characteristics on high-temperature performance for rubber modified asphalt binder[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(2): 347-355.
- [6] 冯新军,杨洪阳,肖洪海,等. 基于SBS结构修复的再生沥青性能及机理研究[J]. 中外公路, 2024, 44(4): 56-63.
FENG Xinjun, YANG Hongyang, XIAO Honghai, et al. Properties and mechanism of reclaimed asphalt based on SBS structure repair[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(4): 56-63.
- [7] 王子鹏,张云飞,赵增刚,等. 硫化橡胶沥青和脱硫橡胶沥青的性能评估[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2024, 48(4): 771-775.
WANG Zipeng, ZHANG Yunfei, ZHAO Zenggang, et al. Performance evaluation of vulcanized rubber asphalt and desulfurized RubberAsphalt[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2024, 48(4): 771-775.
- [8] 杨晚生,易帅兵,戴天乐,等. 废轮胎热解炭黑(TPCB)改性沥青抗紫外老化性能试验研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 103-109.
YANG Wansheng, YI Shuaibing, DAI Tianle, et al. Experimental research on anti-UV aging performance of tire pyrolysis carbon black(TPCB) modified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 103-109.
- [9] 林大军. 高掺量胶粉复合改性沥青制备及存储稳定性研究[J]. 科学技术创新, 2023(24): 169-172.
LIN Dajun. Research on the preparation and storage stability of high content rubber powder composite modified asphalt[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(24): 169-172.
- [10] 交通运输部公路科学研究所. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Technical specification for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [11] 梁云. 橡胶微波硫化过程中的温度场研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.

- LIANG Yun. Study on temperature field during microwave vulcanization of rubber[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016.
- [12] 刘旭. 微波活化胶粉改性沥青及其混合料路用性能研究[J]. 交通世界, 2024(25): 20-22.
- LIU Xu. Study on road performance of microwave activated rubber powder modified asphalt and its mixture[J]. *TranspoWorld*, 2024(25): 20-22.
- [13] 交通运输部公路科学研究所. 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.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] 郭咏梅, 倪富健. 基于DSR的改性沥青及混合料动态黏弹性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 386-390.
- GUO Yongmei, NI Fujian. Dynamic viscoelastic properties of modified asphalt and mixture based on DSR[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(2): 386-390.
- [15] 周志刚, 陈功鸿, 张红波, 等. 橡胶粉/SBS与高黏剂复合改性沥青的制备及性能研究[J]. 材料导报, 2021, 35(6): 6093-6099.
- ZHOU Zhigang, CHEN Gonghong, ZHANG Hongbo, et al. Study on the preparation and properties of modified asphalt by rubber powder/SBS and high viscosity modifier composite[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(6): 6093-6099.
- [16] 张泽. 高掺量橡胶复合改性沥青及混合料路用性能及应用研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- ZHANG Ze. Study on road performance and application of high content rubber composite modified asphalt and mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [17] 龚演, 袁海蛟, 刘军海, 等. 高掺量橡胶改性沥青的高温流变性能与评价指标[J]. 公路交通科技, 2023, 40(增刊1): 49-57.
- GONG Yan, YUAN Haijiao, LIU Junhai, et al. Rheological properties and evaluation index of high content asphalt rubber at high temperature[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2023, 40(sup 1): 49-57.
- [18] JIANG J W, NI F J, ZHENG J Q, et al. Improving the high-temperature performance of cold recycled mixtures by polymer-modified asphalt emulsion[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, 21(1): 41-48.
- [19] 王岚, 单鸣宇, 常春清. 基于DIC技术的老化作用下温拌胶粉改性沥青胶浆低温抗裂性能研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 265-275.
- WANG Lan, SHAN Mingyu, CHANG Chunqing. Low-temperature crack resistance of warm-mixed crumb rubber asphalt mortar under aging effect based on DIC technology[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 265-275.
- [20] 丁天雨, 杨洋, 晏永, 等. 低温脱硫预处理制备橡胶改性沥青的研究[J]. 材料导报, 2024, 38(增刊2): 633-639.
- DING Tianyu, YANG Yang, YAN Yong, et al. Study on preparation of asphalt rubber by low temperature desulfurization pretreatment[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(sup 2): 633-639.
- [21] 刘银春, 孙云志, 汤雄, 等. 废旧橡胶复合改性沥青路用性能研究[J]. 四川建材, 2024, 50(5): 13-14.
- LIU Yinchun, SUN Yunzhi, TANG Xiong, et al. Study on road performance of composite modified asphalt with waste rubber[J]. *Sichuan Building Materials*, 2024, 50(5): 13-14.
- [22] XIN X, ZHANG L, LYU X J, et al. Gradient activation mechanism and performance evaluation of highly-WTR modified asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 465: 140200.
- [23] XIE J, LI S H, HE W, et al. Molecular simulation of graft-activated crumb rubber modified asphalt: A study on high temperature performance and its interface behavior with aggregate[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2025, 58: 105827.
- [24] DONG F Q, JIANG Y, YU X, et al. Reconstruction of crosslinked network in terminal blend rubber powder modified asphalt with BR to enhance thermal storage stability and rheological properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 458: 139751.
- [25] 程培峰, 白月, 李艺铭, 等. 玉米秸秆油对老化沥青流变性能的影响及其再生效果研究[J]. 中外公路, 2024, 44(6): 124-133.
- CHENG Peifeng, BAI Yue, LI Yiming, et al. Effect of corn stover oil on rheological properties of aged asphalt and its regeneration effect[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2024, 44(6): 124-133.
- [26] ZHAO M Z, DONG R K, ZHANG Y, et al. Influence of crosslinking effect on chemical and rheological properties of aged liquid bio-rubber composite SBS modified asphalt[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2024, 25(6): 1298-1323.