DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.052

胶粉对SBS改性沥青流变特性及微观结构的影响

包建业
（内蒙古建筑职业技术学院，内蒙古 呼和浩特 010070）

摘要：基于CR/SBS复合改性沥青的基本性能指标确定废旧胶粉的适宜掺量，采用DSR、BBR试验、扫描电镜试验和红外光谱试验分别对SBS改性沥青和CR/SBS复合改性沥青的流变特性以及微观结构进行对比研究。试验结果表明：掺加18%废旧胶粉的CR/SBS复合改性沥青的高温流变特性、低温流变特性优于SBS改性沥青和CR沥青，抗疲劳特性与SBS改性沥青基本相当。胶粉与SBS改性剂产生了部分化学反应，废旧胶粉在体系中起到了填充作用；同时整个体系形成了改性剂相和沥青相双连续相，形成了致密的空间网络结构，从而使得CR/SBS复合改性沥青的性能优良。

关键词：胶粉；复合改性；流变性能；微观结构

在中国的道路建设中，废旧胶粉改性沥青和SBS改性沥青因其性能优良，是目前使用最普遍的改性沥青。近年来，国内外路面研究工作者们倾向于将SBS改性剂、废旧胶粉和沥青进行适当的混合，以期得到性能更佳的复合改性沥青。

韦大川和王云鹏等通过分析发现CR/SBS复合改性沥青的降噪效果良好，在系统研究与分析的基础上，建立了CR/SBS复合改性沥青中聚合物掺量与吸声系数之间的线性关系；赵桂娥采用4%SBS＋4%CR掺量形成CR/SBS复合改性沥青于室内进行路用性能试验，分析认为该掺量下CR/SBS复合改性沥青的路用性能良好；杨光和申爱琴针对季冻区沥青路面特殊病害问题，通过扫描电镜、红外光谱等试验系统地分析了CR与SBS共混的机理，并以魏茅茨（Wegmouth）粒子干涉理论为核心，研究出一整套适用于CR/SBS复合改性沥青混合料级配改进设计的方法。并重新定义CR/SBS复合改性沥青混合料路用性能指标体系。

[3] Uesugi M, Kishida H. Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sands[J]. Soils and Foundations, 1986,26(2):33－46.

[4] Uesugi M, Kishida H, Tsubakihara Y. Behavior of Sand Particles in Sand－Steel Friction[J]. Soils and Foundations,1988,28(1):107－118.

[5] 夏红春，周国庆.土－结构接触面剪切力学特性及其影响因素试验[J].中国矿业大学学报，2010(6).

[6] 金子豪，杨奇，陈琛，等.粗糙度对混凝土－砂土接触面力学特性的影响试验研究[J].岩石力学与工程学报，2018(3).

[7] Taha A, Fall M. Shear Behavior of Sensitive Marine Clay－Steel Interfaces[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(6): 969－980.

[8] Feligha M, Hammoud F, Belachia M, et al. Experimental Investigation of Frictional Behavior between Cohesive Soils and Solid Materials Using Direct Shear Apparatus [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34(2):567－578.

[9] F. Hammouda, A. Boumekik. Experimental Study of the Behaviour of Interfacial Shearing between Cohesive Soils and Solid Materials at Large Displacement[J]. Asian Journal of Civil Engineering, 2006, 7(1): 63－80.

[10] 张明义，白晓宇，高强，等.黏性土中桩－土界面受力机制室内试验研究[J].岩土力学，2017(8).

[11] 殷雨时，范颖芳，徐义洪.粗糙度对CFRP－混凝土界面剪切粘结性能的影响[J].建筑材料学报，2018(2).

[12] M Irsyam, L Hasan, R D Hryciw. Experimental Study of the Pullout Resistance of Ribbed Anchors in Sands[C]. Proceeding of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.

[13] 郭庆国.粗粒土的工程特性及应用[M].郑州：黄河水利出版社，1999.

收稿日期：2018－11－08
基金项目：山西省基础研究计划项目（编号：2015021074）；山西省交通建设科技项目（编号：15－2－07）
作者简介：包建业，男，大学本科，讲师.E－mail:799190860@qq.com

将废旧胶粉与 SBS 改性沥青按照不同比例混合，制备 CR/SBS 复合改性沥青。工程中使用复合改性沥青不但可以缩减成本，而且可以减少环境污染。该文通过对 CR/SBS 复合改性沥青的流变特性以及微观结构进行研究，以明确 CR/SBS 复合改性沥青的改性效果和性能。

1 试验原材料与试验方法

1.1 试验原材料

采用的原材料分别为 SBS 改性沥青、20 目(0.45 mm)废旧轮胎橡胶粉；另外选用橡胶油作为相容剂，稳定剂采用硫系稳定剂，经过室内试验测试，原材料的性能指标分别如表 1～4 所示。

表 1 SBS 改性沥青性能指标

检测项目	单位	检验结果	技术要求
25 ℃针入度	0.1 mm	69.9	50～70
针入度指数 PI		−0.14	≤0
5 ℃延度	cm	34.5	≥25
软化点($T_{R\&B}$)	℃	67.1	≥65
密度(15 ℃)	g/cm^3	1.018	实测记录
溶解度(三氯乙烯)	%	99.7	≥99

1.2 CR/SBS 改性沥青制备

为研究橡胶粉掺量对 CR/SBS 复合改性沥青性能的影响规律，选取的制备参数为：胶粉掺量为 0%、10%、15%、18%、20%(橡胶沥青占总沥青质量比)、相容剂掺量为 1.0%(质量分数)、稳定剂掺量为 0.4%(质量分数)、胶粉剪切温度为 195 ℃，剪切时间为 2 h。

表 2 橡胶粉的性能指标

项目	相对密度	含水率/%	金属含量/%	纤维含量/%	筛余物/%
测试结果	1.15	0.6	0.02	0.3	7.8
技术要求	1.10～1.30	<1	<0.05	<1	<10

表 3 相容剂性能指标

项目	单位	质量指标	试验方法
运动黏度	Pa·s	25～35	GB/T256
比重		0.98	GB/T508
倾点		+10	GB/T510
黏重常数		0.939	GB/T264
机械杂质		0.007	GB/T511
含腊		无	SHT/0076
水分		无	ASTM1797
闪点	℃	255	ASTM1797
色度		1.5	GB/T6540

1.3 胶粉掺量确定

研究分别对不同废旧胶粉掺量(0%、10%、15%、18%、20%)的 CR/SBS 复合改性沥青的性能进行测试，包括软化点、针入度、延度(5 ℃)、黏度(177 ℃)、弹性恢复(25 ℃)、离析(48 h)等指标。通过分析不同 CR/SBS 复合改性沥青的性能，从而确定合适的胶粉掺量。具体的试验结果如表 5 所示。

表 4 稳定剂的性能指标

颜色	状态	气味	密度/(g·cm^{-3})	溶解度	熔点/℃	沸点/℃	闪点/℃
淡黄色	粉状	特殊臭味	2.36	不溶于水	114	445	168

表 5 不同胶粉掺量的复合改性沥青性能

胶粉掺量/%	软化点/℃	针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	延度(5 ℃)/cm	黏度(177℃)/(Pa·s)	弹性恢复(25 ℃)/%	离析(48 h)/℃
0	68.5	67.1	34.5	1.2	84	3.2
10	71.9	60.3	25.6	1.5	89	3.6
15	73.7	59.0	24.5	1.7	95	4.2
18	77.4	53.0	22.8	2.4	96	4.8
20	78.9	50.0	20.1	3.8	96	5.7

由表 5 可以看出：胶粉的加入可以提高 CR/SBS 复合改性沥青的软化点，且 CR/SBS 复合改性沥青的

软化点随着胶粉掺量的增加而逐渐升高，当胶粉掺量由 18%增至 20%时，软化点升高幅度变缓。胶粉掺量对复合改性沥青的针入度影响也较大，随着胶粉掺量的增加，CR/SBS 复合改性沥青的针入度逐渐降低。此外，随着胶粉掺量的增加，CR/SBS 复合改性沥青的低温延度逐渐减小，在掺量由 18%升至 20%时，其橡胶/SBS 复合改性沥青的延度降低幅度较为显著。CR/SBS 复合改性沥青的 177 ℃黏度随着胶粉掺量的增多而变大，当胶粉掺量超过 18%时，CR/SBS 复合改性沥青的 177 ℃黏度为 3.8 Pa·s，大于规范要求值。当胶粉的掺量由 15%逐渐增加至 20%时，其弹性恢复变化很微弱；而离析程度却较为明显，即其热储存稳定性变差。尤其是当胶粉掺量升至 20%时，其离析度为 5.7 ℃，远远超过了相关指标的要求。综合复合改性沥青的性能，选择胶粉的掺量为 18%。

2　CR/SBS 复合改性沥青流变性能

2.1　高温性能

美国 SHRP 计划中提出采用 $G^*/\sin\delta$ 车辙因子指标来表征沥青的高温性能。Superpave 沥青规范采用 $G^*/\sin\delta$ 作为评价沥青的高温性能指标，可以体现沥青的动黏弹性质。研究通过 DSR 温度扫描试验获得 SBS 改性沥青、橡胶沥青和 CR/SBS 复合改性沥青在 50～80 ℃范围内不同温度（T）对应的车辙因子（$G^*/\sin\delta$），试验结果如图 1 所示。将不同沥青试样的车辙因子进行线性拟合得到相应的破坏温度，如图 2 所示。

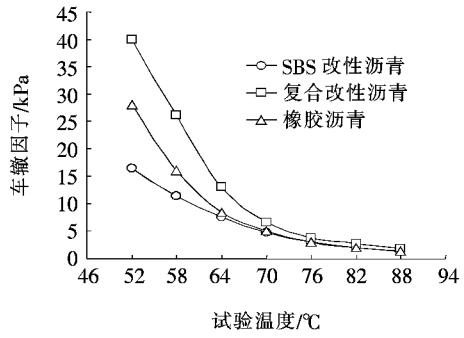

图 1　不同沥青车辙因子

由图 1 可以看出：3 种不同改性沥青的 $G^*/\sin\delta$ 随着温度的升高而逐渐降低，在同一温度下，3 种沥青的车辙因子大小排序为：CR/SBS 复合改性沥青＞橡胶沥青＞SBS 改性沥青。从图 2 可以看出：橡胶沥青破坏温度与 SBS 改性沥青基本相当且略低于 CR/SBS 复合改性沥青，说明 CR/SBS 复合改性沥青的高温性略优于橡胶沥青和 SBS 改性沥青。

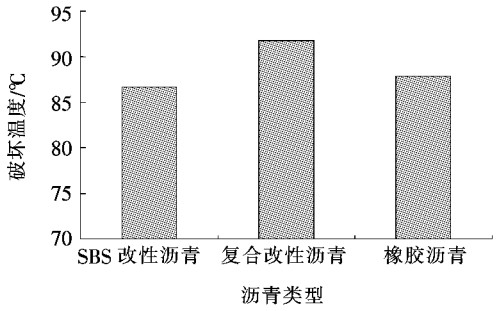

图 2　不同沥青破坏温度

2.2　低温性能

SHRP 沥青结合料规范提出弯曲梁流变试验评价结合料的低温性能，评价指标为蠕变劲度 S 和蠕变速率 m。S 表示结合料抵抗荷载的能力，m 表示加载时结合料劲度随时间的变化率。其中，S 值越小，m 值越大，说明沥青的低温抗裂性越好。研究选用弯曲蠕变试验在－12、－18、－24 ℃时 60 s 的蠕变劲度 S 和蠕变速率 m 评价 SBS 改性沥青、橡胶沥青和 CR/SBS 复合改性沥青的低温性能。试验结果见图 3、4。

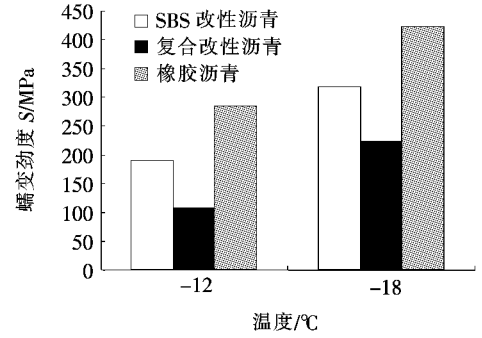

图 3　不同沥青蠕变劲度

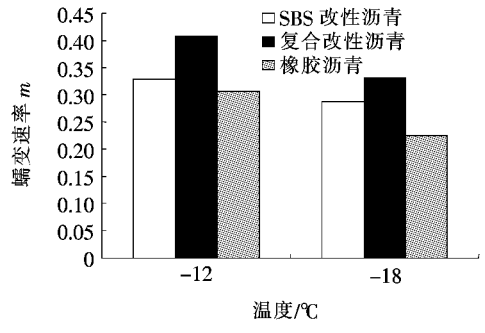

图 4　不同沥青蠕变速率

由图 3、4 可知：随着温度的降低，CR/SBS 复合改性沥青、橡胶沥青和 SBS 改性沥青的 S 值均明显增大，m 值明显减小。在相同温度下，CR/SBS 复合改性

沥青的 S 值小于 SBS 改性沥青，m 值大于 SBS 改性沥青，由此可以看出：CR/SBS 复合改性沥青的低温性能良好，优于 SBS 改性沥青。

2.3 抗老化性能

通过对短期老化和长期老化后的 SBS 改性沥青、橡胶沥青和 CR/SBS 复合改性沥青进行温度扫描试验(35～ 50 ℃，步长为 5 ℃)，确定不同温度时的 $G^*\sin\delta$，试验结果如图 5 所示。

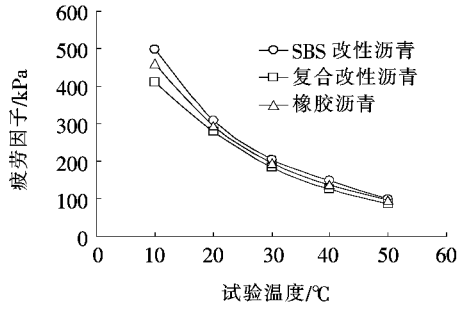

图 5 不同沥青的疲劳因子

由图 5 可以看出：随着温度的升高，3 种改性沥青的疲劳因子均呈现逐渐降低的趋势。在同一温度下，CR/SBS 复合改性沥青的疲劳因子略低于 SBS 改性沥青和橡胶沥青，但相差不大。由此可知：CR/SBS 复合改性沥青的抗疲劳性能与 SBS 改性沥青基本相当，具有较好的抗疲劳性能。

3 微观结构

3.1 扫描电镜试验

扫描电镜(Scanning Electron Microscope，简称 SEM)采用的是逐点成像的图像分解法。电子束在样品上做光栅扫描的同时，显像管中的电子束与此做同步扫描。这样，在荧光屏上显示出样品的表面微观形貌。因此，扫描电子显微镜可以对不同材料拌和后的微观结构进行观察评价。

分别对 SBS 改性沥青(SBS 掺量 3%)和 CR/SBS 复合改性沥青进行扫描电镜试验，试验结果如图 6、7 所示。

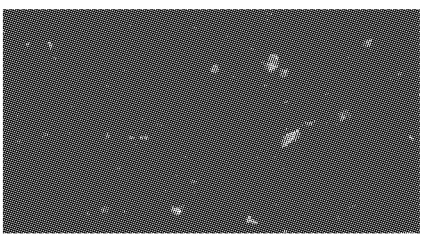

图 6 SBS 改性沥青

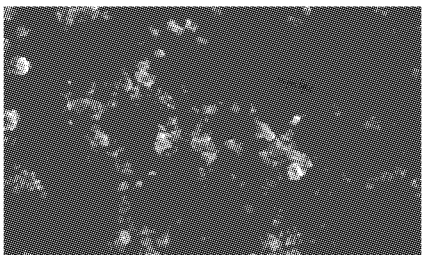

图 7 复合改性沥青

对比图 6、7 可以发现：18%的橡胶粉掺进 SBS 改性沥青的共混体系中后，CR/SBS 复合改性沥青的显微镜图像较普通 SBS 改性沥青的图像更为明亮、颗粒更多，同时发现由于胶粉的掺量远远高于 SBS，大部分橡胶粉表面已被沥青中的轻组分溶解、溶胀，有些轻组分渗入了胶粉里面。分析原因：在高温条件下胶粉和改性沥青混合后，胶粉颗粒吸收了改性沥青中的组分而出现溶胀现象。胶粉颗粒表面形成的凝胶膜使胶粉颗粒之间较好地连接在一起。橡胶颗粒填充在沥青中形成骨架，从而说明其具有填充作用，而 SBS 则作为分散质分散于其中，二者结合在一起构成了紧密的网络结构，从而起到了改性效果。

整体上可以看出，CR/SBS 复合改性沥青中没有出现明显的相界面，说明体系发生了化学反应，其中发生化学反应的为 SBS，橡胶粉在体系中起到了填充作用；同时整个体系形成了改性剂相和沥青相双连续相，并形成了致密的空间网络结构，这也是 CR/SBS 复合改性沥青性能优异的本质。

3.2 红外光谱试验

在道路工程领域，红外光谱仪常被用来研究改性沥青的结构，可以通过红外光谱图分析改性沥青的分子结构和判断沥青中是否有新的官能团产生。

研究分别对 SBS 改性沥青和 CR/SBS 复合改性沥青的试样进行了红外光谱分析，得到各试样的红外光谱图如图 8、9 所示。

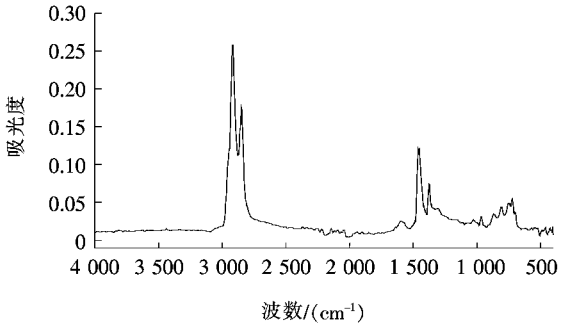

图 8 SBS 改性沥青红外光谱图

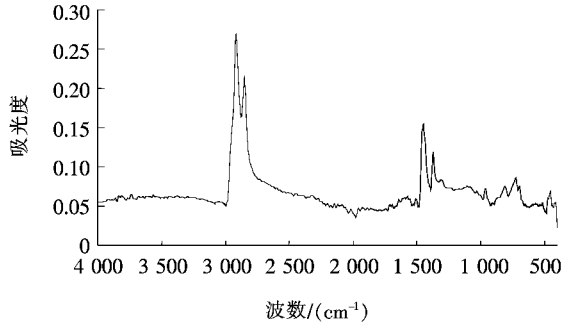

图 9　复合改性沥青红外光谱图

从图 8、9 可以看出：CR/SBS 复合改性沥青出现的峰型与 SBS 改性沥青基本相同，而不同点是，在 SBS 改性沥青较为明显的 699、966 cm^{-1} 处的特征峰在 CR/SBS 复合改性沥青的谱图中强度相对要弱一点。为了进一步分析，通过 699、966 cm^{-1} 处特征吸收峰面积比来进行定量研究，具体结果见表 6。

表 6　不同沥青特征吸收峰面积

沥青类型	A699	A966	A699/A966
SBS 改性沥青	0.148	0.141	1.054
CR/SBS 复合改性沥青	0.152	0.143	1.061

A699 表示 699 cm^{-1} 处 SBS 的苯环上 C—H 面外摇摆振动形成的特征吸收峰面积，表征该官能团特征峰的吸收强度，A966 表示 966 cm^{-1} 处 SBS 中反式丁二烯两段 C—H 的面外摇摆振动形成的特征吸收峰面积，表征该官能团特征峰的吸收强度。A699/A966 这个值在忽略 SBS 与沥青或胶粉发生少量的化学作用的前提下应该是一个定值，通过计算 SBS 改性沥青和 CR/SBS 复合改性沥青的 A699/A966 值分别为 1.054、1.061，可以发现 CR/SBS 复合改性沥青 A699/A966 值较 SBS 改性沥青有所升高，但不明显，说明胶粉与 SBS 改性剂发生了部分化学反应。

4　结论

（1）综合 CR/SBS 复合改性沥青的基本性能指标，选择胶粉的掺量为 18%。

（2）CR/SBS 复合改性沥青的高温流变性能、低温流变性能优于SBS改性沥青和橡胶沥青，抗疲劳性能与 SBS 改性沥青基本相当。

（3）扫描电镜结果表明：CR/SBS 复合改性沥青中没有出现明显的相界面，SBS 在其中发生了化学反应，橡胶粉在体系中起到了填充作用；同时整个体系形成了改性剂相和沥青相双连续相，并形成了致密的空间网络结构。

（4）红外光谱试验结果表明：SBS 改性沥青和 CR/SBS 复合改性沥青的特征吸收峰面积比有所差异，胶粉与 SBS 改性剂发生了部分化学反应。

参考文献：

[1] 张永辉.SBS 改性沥青和橡胶粉改性沥青机理及路用性能研究[D].长安大学硕士学位论文，2015.

[2] 韦大川.橡胶粉/SBS 复合改性沥青降噪试验研究[D].吉林大学博士学位论文，2008.

[3] 赵桂娥.胶粉与 SBS 复合改性沥青的合理掺量及性能评价[J].湖南交通科技，2013(3).

[4] 杨光，申爱琴，陈志国，等.季冻区橡胶粉与 SBS 复合改性沥青混合料性能及改性机理[J].长安大学学报：自然科学版，2015(6).

[5] 杨光.季冻区工厂化废橡胶粉/SBS 复合改性沥青(CR/SBSCMA)及混合料性能研究[D].长安大学博士学位论文，2016.

[6] 赵培松.基于抗老化和高温流变分析的废机油改性沥青性能评价[J].公路工程，2016(3).

[7] Al－Khateeb G G, Ramadan K Z. Investigation of the Effect of Rubber on Rheological Properties of Asphalt Binders Using Superpave DSR[J].KSCE Journal of Civil Engineering，2015，19(1)：127－135.

[8] 徐波，王凯.泡沫温拌橡胶沥青的低温性能与评价指标[J].河南科技大学学报：自然科学版，2016(3).

[9] 郭莹莹，李超，飞虹.改性沥青低温弯曲蠕变性能试验研究[J].内蒙古工业大学学报：自然科学版，2016(1).

[10] Nejad F M，Tanzadeh R，Tanzadeh J，et al. Investigating the Effect of Nanoparticles on the Rutting Behaviour of Hot－Mix Asphalt[J].International Journal of Pavement Engineering，2016，17(4)：1－10.

[11] 刘祥.温拌 SBS 改性沥青粘附特性的微观机理研究[D].兰州交通大学硕士学位论文，2016.

[12] 方彬彬，叶园园，李承烈，等.不同胶粉改性沥青抗老化性能对比[J].中外公路，2017(4).