

胶粉/SBS复合改性沥青性能评价研究

刘勇

(广东省建筑设计研究院集团股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 为了结合SBS改性沥青和橡胶沥青这两种不同改性沥青的优点, 首先采用湿法分别在SBS改性沥青中掺入6%、9%、12%、15%的胶粉, 制备了复合改性沥青; 然后对其进行了全面的性能评价。针入度、软化点以及动态剪切试验表明, 胶粉可以有效改善沥青的高温性能、黏弹性和疲劳性能, 增加沥青的高温抗变形能力和抗疲劳老化能力; 黏度试验表明, 胶粉可以较大程度地增大沥青的表观黏度; 延度以及低温弯曲流变试验表明, 胶粉对于沥青的低温性能改善不大, 原因是复合改性沥青中游离颗粒的存在。根据复合改性沥青的性能评价结果, 最后确定复合改性沥青中胶粉的最佳掺量为12%。

关键词: 胶粉; SBS改性沥青; 复合改性沥青; 性能评价

中图分类号: U412; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0100-05

Research on Performance Evaluation of Rubber Powder / SBS Composite Modified Asphalt

LIU Yong

(Guangdong Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: In order to combine the advantages of two different types of modified asphalt such as SBS modified asphalt and rubber asphalt, firstly, a wet method is used to add the rubber powder of 6%, 9%, 12% and 15% into SBS modified asphalt, which prepares the composite modified asphalt. And then a comprehensive performance evaluation is conducted for it. The penetration, softening point and dynamic shear tests show that the rubber powder can effectively improve the high-temperature, viscoelastic and fatigue performances of asphalt, and increase the high-temperature anti-deformation ability and anti-fatigue aging ability of asphalt. The viscosity tests show that rubber powder can significantly increase the apparent viscosity and ductility of asphalt. The low-temperature flexural rheology tests indicate that the rubber powder has little effect on improving the low-temperature performance of asphalt, mainly due to the presence of free particles in the composite modified asphalt. Finally, based on the performance evaluation result of the composite modified asphalt, the optimal dosage of rubber powder in the composite modified asphalt is determined to be 12%.

Keywords: rubber powder; SBS modified asphalt; composite modified asphalt; performance evaluation

0 引言

近年来,我国经济的高速发展推动了道路建设的长足进步。无论是公路还是市政道路,其中绝大部分高等级路面均为沥青混合料路面。随着车辆载重越来越大,普通沥青路面易出现推移、鼓包和开裂等病害,故高等级沥青路面多采用应用广泛的SBS改性沥青。但是因需求增大、厂家增多等因素而易出现质量良莠不齐问题,许多高等级的重载路面在投入使用初期就出现了病害,从而严重影响了道路的使用体验。

另外,我国汽车保有量呈现逐年增长的趋势,废旧轮胎等橡胶垃圾也日渐积累,虽然将其制成胶粉用于橡胶沥青混合料是处理途径之一,但橡胶沥青因存在存储稳定性等问题^[1],致使其目前并未得到大范围应用。鉴于单一改性剂沥青难以满足需求日益增长的重载交通以及繁忙交通量,加上SBS改性沥青与橡胶沥青各有优劣,国内外逐渐开始研究胶粉/SBS复合改性沥青^[2-3],旨在结合2种改性剂的优势,生产出性能更加优良的沥青。目前,国内外在各级道路工程中应用胶粉/SBS复合改性沥青的实例日渐增加,技术也越发成熟^[4-5]。在此背景下,本文研究了不同胶粉掺量下复合改性沥青的性能表现。

收稿日期: 2025-10-25

作者简介: 刘勇(1993—),男,硕士,工程师,从事市政道路设计工作。

1 胶粉/SBS 复合改性沥青的制备

1.1 原材料

本文选用的胶粉采用常温粉碎法制成,粒度为 30 目(筛孔尺寸为 0.600 mm)。制成之后为增加胶粉的活性,采用反应剂对胶粉进行了预处理,处理之后的胶粉表面凹凸不平,比表面积更大。

1.2 胶粉掺量和制备方法

胶粉/SBS 复合改性沥青的制备采用湿法,即直接在成品 SBS 改性沥青中加入胶粉。胶粉掺量定为 SBS 改性沥青质量的 6%、9%、12%、15%。

1.3 制备流程

(1)备料与预热。按比例准备好所需要的 SBS 改性沥青和胶粉,然后将 SBS 改性沥青加热到 180 ℃,并保证 SBS 改性沥青内部温度均匀。

(2)初混。待 SBS 改性沥青到达 180 ℃之后,将胶粉分次加入,每次加入之后,搅拌至无明显胶粉颗粒再继续添加。

(3)高温剪切和反应。使用高速剪切仪器让胶粉与 SBS 改性沥青充分混合反应。先使用高速剪切仪在转速(2 500±30) r/min 下预剪切 20 min;然后调整转速为(5 000±100) r/min,正式剪切 100 min;整个剪切过程温度应控制在(185±5) ℃。需要特别注意的是,在高速剪切过程中由于摩擦生热的原因沥青的温度会升高,若出现温度过高,可以短暂降低转速,以此确保整个制备过程中温度均在要求范围内。

(4)恒温发育。高速剪切完成之后,复合改性沥青需在 135 ℃环境中发育 1.5 h,此过程是为了保证胶粉与 SBS 改性沥青充分反应。待沥青表面没有气泡冒出时,表明复合改性沥青已经发育完成,完成复合改性沥青的制备。

2 传统三大指标评价

沥青的三大传统评价指标分别是反映沥青黏稠程度的指标针入度、反映高温稳定性的指标软化点、反映低温性能的延度。在不同胶粉掺量下,胶粉/SBS 复合改性沥青三大传统评价指标试验结果见图 1 至图 3。

由图 1 可知,胶粉的加入可以明显降低 SBS 改性沥青的针入度,使沥青变得更加黏稠。

由图 2 可知,胶粉的加入可以提高 SBS 改性沥青的软化点,改善沥青的高温稳定性,且胶粉掺量由 9% 增加到 12% 时提升幅度很大。

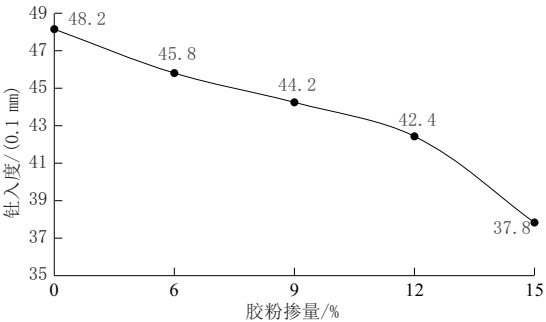


图 1 针入度试验结果

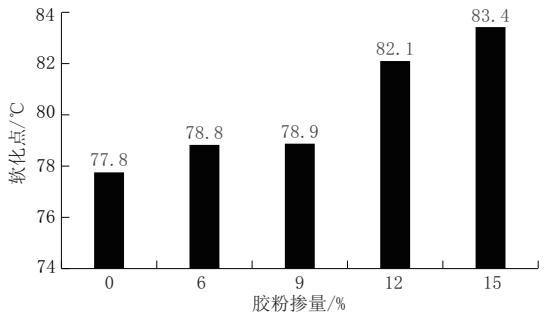


图 2 软化点试验结果

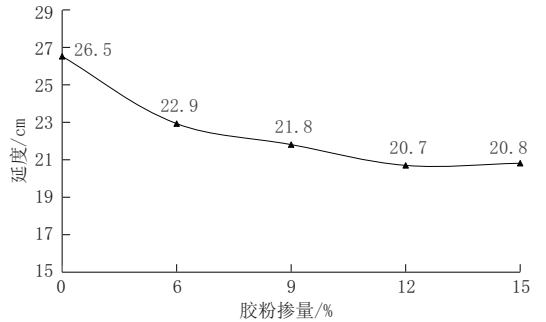


图 3 延度试验结果

由图 3 可知,胶粉的加入会降低 SBS 改性沥青的延度,尤其是掺量从 0% 增至 6% 时,发生了较大幅度的下降,而后随着掺量的增加下降的幅度逐渐减小。分析其原因,是因为在复合改性沥青体系内,部分胶粉未完全融合,呈游离颗粒状分布。进行延度试验时,拉伸动作会让这些游离颗粒周围形成应力集中区域。该区域的存在导致沥青断裂时,断面无法达到标准试验要求的“近零面积”状态,反而形成较大断裂面,最终使测得的延度结果偏低。

3 沥青黏度指标评价

沥青黏度是衡量沥青黏滞性,即抵抗流动能力的核心指标,直接决定着沥青混合料的拌和、摊铺施工难度及路面高温稳定性。布氏旋转黏度试验是测定沥青(尤其高黏度改性沥青)在特定温度下黏度的核心方法^[6-7],通过模拟施工剪切环境,直接为混合料拌和、压实温度提供依据。

布氏旋转黏度试验的主要原理是将沥青样品加热至设定温度,让带有特定转子的主轴在沥青中以恒定转速旋转,沥青对转子的阻力会转化为扭矩,仪器再根据扭矩、转速和转子参数计算出沥青的动力黏度。结合胶粉/SBS复合改性沥青的特点和相关研究成果^[8-10],试验统一选用SC4-27号转子,具体试验过程如下:

(1)在试验过程中,读取2次黏度数值,一次是扭矩接近但不大于90%,另外一次是扭矩接近但是不小于10%。

(2)对2次黏度试验结果进行回归运算,取50%扭矩对应的黏度值作为对应试验温度下的黏度。

(3)选择135、155、175℃这3个温度进行黏度试验。

复合改性沥青布氏旋转黏度试验结果见表1;黏温曲线见图4,其拟合可决系数 R^2 见表2。

表1 复合改性沥青布氏旋转黏度试验结果 单位:Pa·s

胶粉掺量/%	135℃	155℃	175℃
0	1.25	0.75	0.31
6	2.96	2.29	1.40
9	3.37	2.64	1.50
12	3.70	2.87	1.54
15	4.25	3.31	1.68

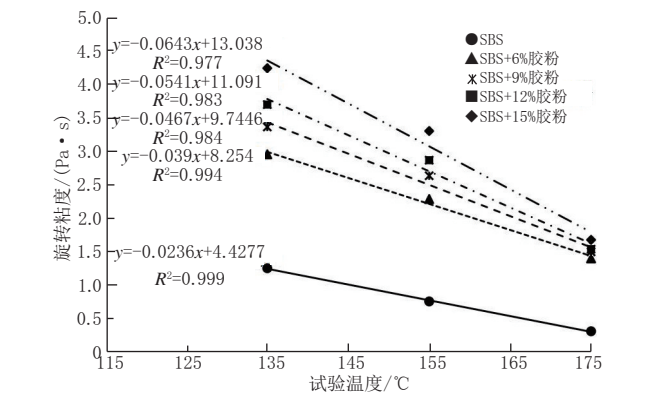


图4 复合改性沥青黏温曲线

表2 复合改性沥青黏温曲线拟合可决系数 R^2

胶粉掺量/%	R^2
0	0.999
6	0.994
9	0.984
12	0.983
15	0.977

由表1、图4可知:

(1)胶粉对于SBS改性沥青黏度的提升效果非常大,且其黏度随着掺量的增加而增大。

(2)复合改性沥青黏温曲线拟合可决系数 R^2 随

着胶粉掺量的增加而减小,说明模型对数据的拟合程度在降低,即复合改性沥青的黏度表现为非线性变化。

(3)当胶粉掺量逐步提高时,黏温曲线斜率呈增大趋势,这意味着复合改性沥青的黏度对温度的敏感程度在不断增强。

4 动态剪切流变试验

4.1 试验原理

动态剪切流变试验(DSR试验)是评价沥青及沥青胶结料黏弹性能的核心方法。通过施加动态剪切荷载,模拟路面在车辆反复荷载和不同温度下的受力状态,可用于评估沥青高温抗车辙和低温抗疲劳能力^[11]。其主要原理是将沥青样品置于上下两个平行圆盘之间,下盘固定、上盘施加正弦交变剪切荷载,通过测量沥青产生的应力和应变响应,计算黏弹性参数,反映沥青在动态荷载下的抵抗变形能力和能量耗散特性。通过DSR试验,可以得到沥青复数剪切模量 G^* 和相位角 δ 。 G^* 反映沥青在动态剪切荷载下抵抗总变形的能力, G^* 值越大,沥青刚度越大,高温下抗流动变形能力越强。 δ 反映沥青黏弹性的比例, δ 值越小,沥青中弹性成分越多、黏性成分越少,说明沥青在荷载作用下的弹性恢复能力越强,高温抗永久变形性能越好;反之则由黏性主导,易产生车辙。

改性沥青的高温抗车辙性能可借助58~82℃温度区间内的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 进行评估;改性沥青的中温抗疲劳能力可借助经过旋转薄膜烘箱试验(RTFOT)老化及压力加速老化试验(PAV)的沥青在10~22℃温度区间内的疲劳因子 $G^* \cdot \sin \delta$ 进行评价。

复合改性沥青的车辙因子 $G^*/\sin \delta$ 和疲劳因子 $G^* \cdot \sin \delta$ 试验结果见图5、图6。

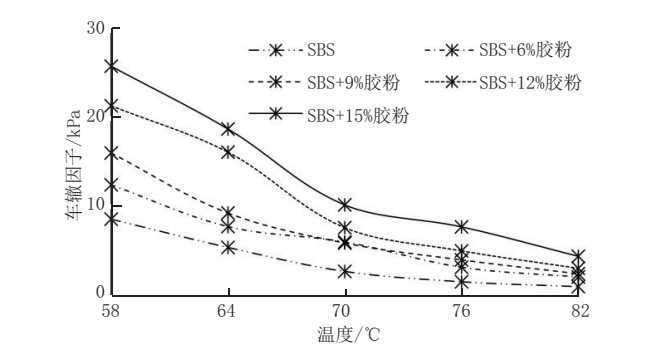


图5 复合改性沥青车辙因子

由图5、图6可知:

(1)胶粉的加入可以明显提高SBS改性沥青的

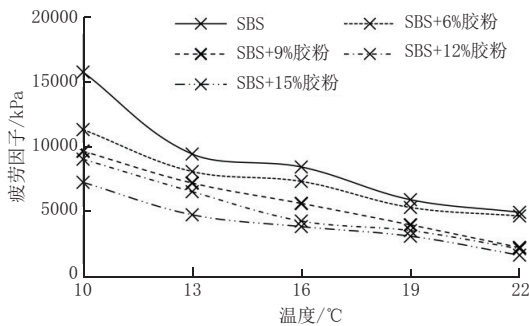


图6 复合改性沥青疲劳因子

车辙因子,提升沥青的高温抗变形能力。

(2)随着温度上升,复合改性沥青的车辙因子差异逐渐缩小,这表明在温度较高的环境下,不同胶粉掺量对复合改性沥青的性能改善作用在不断减弱。

(3)胶粉可以降低 SBS 改性沥青在中温条件下的疲劳因子,提升其抗疲劳性能。

(4)复合改性沥青中,随着温度的变化,疲劳因子的数值有不同幅度的变化,温度越高,其差距越小。

4.2 沥青性能分级试验

在 Superpave 沥青胶结料的评价体系中,PG 分级是其中重要的标准之一^[12-13]。

4.2.1 高温性能

高温等级的基准起始温度为 46℃,各级别间以 6℃为固定温差递增。最终高温等级需通过 2 次测试并取最小值确定,具体流程如下:

(1)测试原样沥青胶结料的车辙因子 $G^*/\sin \delta$,需满足 $G^*/\sin \delta \geq 1.0 \text{ kPa}$ 这一指标,由此得出原样沥青胶结料的高温等级。

(2)对沥青进行 RTFOT 老化后,再次测试其车辙因子,需满足 $G^*/\sin \delta \geq 2.2 \text{ kPa}$ 这一指标,由此得出经过 RTFOT 老化的沥青高温等级。最终以上述 2 个等级中温度更低的那个作为该沥青的高温性能等级。

4.2.2 中温性能

中温等级的基准起始温度为 10℃,各级别间以 3℃为固定温差递增。确定方式如下:先对沥青依次进行 RTFOT 老化和 PAV 老化处理,以模拟沥青在路面使用后期的老化状态。测试老化后沥青的疲劳因子 $G^* \cdot \sin \delta$,需满足 $G^* \cdot \sin \delta \leq 5\,000 \text{ kPa}$ 这一指标,符合要求的对应温度即为该沥青胶结料的中温性能等级。

4.2.3 PG 分级结果

复合改性沥青高温、中温 PG 分级结果见表 3。
由表 3 可知:

表3 复合改性沥青高温和中温 PG 分级结果

胶粉掺量/%	PG 高温等级		PG 高温等级	PG 中温等级
	原样	RTFOT		
0	76	76	76	19
6	82	82	82	19
9	88	88	88	16
12	94	88	88	13
15	94	94	94	10

(1)胶粉能显著提高沥青的 PG 高温等级,同时对其 PG 中温等级也有明显的提升作用。

(2)复合改性沥青经短期老化(RTFOT)处理后,其 PG 高温等级与未老化的原样沥青基本持平,这表明该沥青具备较出色的短期抗老化性能。

(3)从 PG 中温等级的试验结果来看,胶粉可以改善沥青的中温抗疲劳性能,而且掺量越高、效果越好。

5 低温弯曲流变试验

低温弯曲流变试验(BBR 试验)是评价沥青胶结料低温抗裂性能的核心方法。通过模拟低温环境下沥青受弯时的应力松弛行为,判断其在路面低温收缩时是否易产生开裂。其主要原理是将沥青制成标准小梁试件(12.7 mm×6.35 mm×127 mm),在设定低温下通过支点对试件施加恒定荷载,使试件产生弯曲变形;通过监测不同时间的蠕变劲度和蠕变速率来评估沥青在低温下的柔韧性和应力松弛能力^[14-15]。

通过 BBR 试验可以得到 2 个反映沥青低温路用性能的指标。其中:蠕变劲度模量 S 反映低温下沥青抵抗弯曲变形的能力, S 值越小,说明沥青在低温下的柔韧性越好,受弯时产生的应力越小,越不易开裂;蠕变速率 m 反映沥青在恒定荷载下的应力松弛能力, m 值越大,说明沥青在低温下的应力松弛速度越快,能更好地释放因温度收缩产生的应力。BBR 试验结果是确定沥青 PG 分级中低温等级的核心依据,直接决定着沥青能否在特定低温地区使用,避免冬季路面因沥青低温脆裂出现裂缝。

在确定低温失效温度的过程中,利用蠕变劲度模量 S 和蠕变速率 m 的规范判定标准,分别计算出低温失效温度 T^* 和 $T^{\#}$,然后选取两者中较高值作为沥青的最终低温失效温度。这一选择原则是为了确保沥青在更严苛的低温条件下仍能满足性能要求,避免低温开裂风险。

复合改性沥青低温 PG 分级结果见表 4。

表4 复合改性沥青低温PG分级结果

胶粉掺量/%	PG 低温失效温度		PG 低温等级
	T^m	T^u	
0	-25.6	-24.8	-22
6	-30.4	-25.4	-25
9	-32.6	-25.1	-25
12	-33.4	-25.2	-25
15	-37.4	-26.2	-25

由表4可知,胶粉可以降低沥青的劲度模量,从而降低低温时沥青的内部应力,但是却不能有效改善其蠕变速率,即无法改善温度应力的松弛速度,从而无法有效避免因应力集中导致的开裂。沥青优异的低温性能需要有低的蠕变劲度模量和高的蠕变速率,因此可以推断相对SBS改性沥青,复合改性沥青的低温性能提升有限。

6 胶粉最佳掺量

表5汇总了所有复合改性沥青的试验结果。经过综合分析,最终确定12%为胶粉/SBS复合改性沥青中的胶粉最佳掺量。

表5 复合改性沥青的胶粉最佳掺量建议表

指标	建议胶粉掺量/%
针入度	≥12
软化点	≥9
延度	≤12
布氏旋转黏度	≤15
PG 高温等级	≥6
PG 中温等级	≥9
PG 低温等级	≥6

7 结 语

- (1)复合改性沥青中胶粉的最佳掺量为12%。
- (2)胶粉的加入能有效降低沥青的针入度并提高其软化点,但是由于胶粉颗粒的存在所产生的应力集中现象,导致胶粉对沥青延度的改善较为有限。
- (3)胶粉可以对沥青布氏旋转黏度产生显著提升效果,该提升不仅可增强沥青的弹性恢复能力,还能提高其抗剪切能力;复合改性沥青的黏度随着温度上升表现为非线性变化,且其黏温曲线的斜率随着胶粉掺量的增加呈增大趋势,说明复合改性沥青

的黏度对温度的敏感程度在不断增强。

(4)向沥青中添加胶粉后,其车辙因子得到有效提高,疲劳因子相应降低。这一变化表明,胶粉可强化沥青在高温环境下抵抗变形的能力,同时提升其中温阶段的抗疲劳性能。从PG性能分级结果来看,添加胶粉后沥青的高温性能和中温性能均实现了较理想的改善。但低温弯曲流变试验结果说明,复合改性沥青的低温性能表现并不出色。

(5)通过对胶粉/SBS复合改性沥青性能的综合分析可知,胶粉/SBS复合改性沥青更适用于夏季天气炎热、冬季也不严寒的地区。

参考文献:

[1] 尚云龙,王东浩,任志彬.湿法橡胶沥青存储稳定性研究综述[J].中国塑料,2025,39(8):75-82.

[2] 王家旻,向丽,袁军,等.废胶粉/SBS复合改性沥青溶胀工艺研究[J].石油沥青,2011,25(1):62-66.

[3] Wang Y, Zhan B C, Cheng J. Study on preparation process of SBS / crumb rubber composite modified asphalt[J]. Advanced Materials Research, 2012, 450-451: 417-422.

[4] 宋家楠,黄治治,徐向辉.胶粉/SBS复合改性沥青与SBS改性沥青、橡胶沥青的基本性能比较研究[J].北方交通,2012(7):24-26.

[5] 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,2013,39(3):36-40.

[6] 孙杨勇,张起森.沥青粘度测定及其影响因素分析[J].交通科学与工程,2002,18(2):67-70.

[7] 林江涛,孙洪福.沥青粘度的不同测试方法研究[J].山东交通科技,2011(3):12-13.

[8] 张立敏,刘汉中.废旧轮胎橡胶粉复合改性沥青布氏旋转粘度试验分析[J].交通建设与管理,2011(4):21-22.

[9] 杨克红,毛三鹏,邹海燕,等.沥青旋转粘度试验及其影响因素探讨[J].石油沥青,2011,25(5):48-52.

[10] 石蕾,夏红余.橡胶沥青旋转粘度试验及影响因素[J].城市建设理论研究:电子版,2014(17):757-758.

[11] 钟阳,李明亮.橡胶沥青的动态剪切流变试验分析[J].石油沥青,2009,23(1):31-36.

[12] 徐世法,周朝晖,钱培中,等.Superpave规范对于改性沥青的有效性分析[J].公路交通科技,2003,20(1):41-44.

[13] 刘德鹏,刘德卫,张德欧.沥青胶结料PG分级指标体系及其适用性[C]//2015年2月建筑科技与管理学术交流会论文集.北京:建筑科技与管理学术委员会,2015:22-26.

[14] 银花,李凯.基于弯曲梁流变试验和黏弹性理论评价沥青低温性能研究[J].功能材料,2021,24(1):31-36.

[15] 王立志,魏建明,张玉贞.用弯曲梁流变仪评价道路沥青的低温性能[J].中国石油大学学报(自然科学版),2009,33(1):26-29.