

胶粉/SBS复合改性沥青工程应用研究

孙立君

内蒙古高等级公路建设开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2022年3月1日; 录用日期: 2022年4月13日; 发布日期: 2022年4月20日

摘要

依托项目工程进行了胶粉/SBS复合改性沥青工程应用研究, 基于马歇尔试验法确定了混合料最佳沥青用量为5.1%, 基于车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂试验和浸水马歇尔试验表明混合料路用性能良好。分析了胶粉/SBS复合改性沥青制备方法及混合料施工工艺, 对施工路段进行现场检测, 各项指标均满足规范要求。基于汉堡车辙试验对现场芯样的高温稳定性和水稳定性进行检测, 混合料变形深度小、变形曲线无明显剥落点, 具有良好的高温稳定性和抗水损害能力。

关键词

胶粉/SBS复合改性沥青, 路用性能, 施工工艺, 现场检测, 汉堡试验

Study on Engineering Application of Rubber Powder/SBS Composite Modified Asphalt

Lijun Sun

Inner Mongolia High-Grade Highway Construction and Development Co., Ltd., Hohhot Inner Mongolia

Received: Mar. 1st, 2022; accepted: Apr. 13th, 2022; published: Apr. 20th, 2022

Abstract

Based on the project, the engineering application research of rubber powder/SBS composite modified asphalt is carried out. Based on the Marshall test method, the optimal asphalt content of the mixture is determined to be 5.1%. Based on the rutting test, low-temperature bending test, freeze-thaw splitting test and water immersion Marshall test, the pavement performance of the mixture is good. The preparation method and mixture construction technology of rubber powder/SBS com-

posite modified asphalt are analyzed. The construction section is tested on site, and all indexes meet the specification requirements. Based on the Hamburg rutting test, the high-temperature stability and water stability of the on-site core sample are tested. The mixture has small deformation depth, no obvious peeling point in the deformation curve, and has good high-temperature stability and water damage resistance.

Keywords

Rubber Powder/SBS Composite Modified Asphalt, Road Performance, Construction Technology, Field Inspection, Hamburg Test

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

随着我国“一带一路”政策的实施，交通运输建设作为国家基础设施对于促进国家经济发展有着非常重要的作用。交通运输行业的发展带动了公路交通建设的进步，截止到2020年底，我国公路总里程已超过485万公里，其中高速公路15.5万公里，位居世界第一位，其中沥青路面作为我国高等级公路的主要形式，在公路交通发展过程中发挥了重要的作用[1]。现阶段SBS改性沥青因其良好的高、低温性能，作为公路交通建设的首选材料被广泛应用，但SBS改性沥青费用高、抗老化性能差是其不可忽视的问题[2][3]。随着国家经济的飞速发展，我国汽车保有量也持年增加，从而产生的废旧轮胎不能得到有效的回收利用，大量堆放的废旧轮胎不仅占用土地而且严重污染自然环境。在国家大力推进“碳达峰”和“碳中和”的新时代背景下，如何实现废旧轮胎的有效利用，已成为当下重要研究热点。

相关研究表明将废旧轮胎通过加工处理制成不同目数的胶粉并按照一定的比例加入到沥青中，经过溶胀、剪切和发育过程，制备成胶粉改性沥青应用于道路工程不仅能够实现废旧轮胎的循环利用更能显著提升沥青混合料的路用性能[4][5]，有着广泛的应用前景。M. Sienkiewicz [6]提出废旧轮胎比表面积和胶粉粒径大小是影响胶粉改性沥青性能指标的重要影响因素。Zhen Leng、Tianqing Ling [7][8]对胶粉复合改性沥青及混合料性能指标进行了研究，发现胶粉的掺入能够提升沥青的高温及抗老化性能，同时混合料的动稳定度、低温抗裂性能及抗疲劳性能均有一定程度的提升。Yaseen、Yan [9][10]等研究发现掺入胶粉可以提高沥青的高温性能及抗疲劳性能，并显著降低SBS改性剂的掺量，具有良好的经济性。Easa [11]基于沥青流变试验和扫描电镜试验，分析了胶粉沥青的阻尼特性和降噪机理，研究发现胶粉和SBS共同作用下，沥青有效阻尼对应的温度域有所提高，沥青的降噪性能随之增加。

魏永政[12]分析了活化作用对胶粉沥青的影响规律，研究表明活化作用可以显著降低胶粉沥青的黏度，增加胶粉在沥青中的溶解度。李关龙[13]分析了胶粉-SBS复合改性沥青强度形成机理，认为SBS与基质沥青共混形成网状结构，提升了沥青的力学强度，胶粉在沥青中以链段的形式嵌入到网状结构中，进一步加强了沥青的强度和稳定性。胡长远[14]基于微波辐射技术对胶粉改性剂进行活化处理，研究发现微波技术可以破坏胶粉的交联结构，显著提升胶粉与沥青的相容性。刘勇、王笑凤[15][16]等对胶粉复合改性沥青的微观结构进行了分析，研究发现SBS和胶粉在沥青体系中形成网络结构增强了复合改性沥青的韧性和强度。为了进一步评价胶粉复合改性沥青在工程中的应用效果，本文基于内蒙古实体工程项目，进行胶粉复合改性沥青工程应用研究。

2. 原材料

2.1. 沥青

项目所用基质沥青为 SK-90 号沥青, 将 3% 的 SBS 改性剂和 18% 的橡胶粉加入到基质沥青中, 通过溶胀、剪切、发育等沥青改性工艺制备胶粉/SBS 复合改性沥青, 并从现场抽取代表性样品进行相关试验, 实验结果如表 1 所示。

Table 1. Technical specifications of rubber powder/SBS compound modified asphalt

表 1. 胶粉/SBS 复合改性沥青技术指标

检测项目	技术要求	试验结果	试验方法	
针入度(25℃, 5 s, 100 g)/0.1mm	40~70	63.6	T0604	
延度(5cm/min, 5℃, cm)	≥20	30.7	T0605	
软化点(℃)	≥60	62.7	T0606	
运动粘度(175℃, Pa·s)	1~4	1.61	T0619	
闪点(℃)	≥230	270	T0611	
25℃弹性恢复	≥75	94.5	T0662	
离析, 软化点差(℃)	≤6.0	1.3	T0606	
密度(25℃, g/cm ³)	实测记录	1.02	T0603	
旋转薄膜	质量损失(%)	≤±1.0	0.14	T0608
老化试验	针入度比(25℃, %)	≥60	77.3	T0604
(163℃, 85 min)	延度(5℃, cm)	≥10	23.6	T0605

研究表明项目所用沥青满足内蒙古地方标准《胶粉改性沥青及混合料设计与施工规范》(DB15_T 1417-2018)中对胶粉/SBS 复合改性沥青的技术要求。

2.2. 集料

项目所用集料为玄武岩, 按照粒径大小可分为 10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm、0~3 mm 共 4 档, 对所用集料性能指标进行检测, 试验结果如表 2 所示。

Table 2. Aggregate technical indicators

表 2. 集料技术指标

技术指标	单位	技术要求	试验方法	集料规格(mm)			
				10~20	5~10	3~5	0~3
毛体积密度	g/cm ³	实测值	T 0304-2005	2.743	2.733	2.733	2.727
表观密度	g/cm ³	实测值		2.894	2.905	2.901	2.922
针片状含量	%	≤15	T 0312-2005	9.8	10.6		
压碎值	%	≤26	T 0316-2005		9.9		
吸水率	%	实测值	T 0304-2005	1.90	2.17	2.12	2.45
磨耗值	%	≤28	T 0317-2005		11.7		

Continued

黏附性	/	≥4		4
砂当量	%	≥60	T 0334-2005	63.8
棱角性	s	≥30	T 0345-2005	36.9

研究表明项目所用集料满足行业标准《公路沥青路面施工技术规程》JTG F40-2004 中对工程集料的技术要求。

2.3. 填料

项目所用填料为石灰岩经磨细得到的矿粉，矿粉洁净、干燥，对所用矿粉性能指标进行检测，试验结果如表 3 所示。

Table 3. Technical indicators of mineral powder

表 3. 矿粉技术指标

技术指标	技术要求	试验方法	检测结果
表观相对密度	≥2.50	T 0352	2.678
含水量(%), 不大于	≤1	T 0103	0.1
亲水系数	<1	T 0353	0.6
加热安定性	实测记录	T 0355	无明显颜色变化
塑性指数	<4	T 0354	2.8
粒度范围(<0.6 mm)	100	T 0351	100
粒度范围(<0.15 mm)	90~100	T 0351	95.4
粒度范围(<0.075 mm)	75~100	T 0351	76.8

研究表明项目所用矿粉满足行业标准《公路沥青路面施工技术规程》JTG F40-2004 中对工程填料的技术要求。

3. 混合料配合比设计及性能评价

3.1. 混合料级配设计

合理的级配组成及最佳的沥青用量设计是保证沥青混合料良好路用性能的关键，基于马歇尔试验法进行沥青混合料配合比设计，混合料级配类型为 AC-20，级配组成如表 4 所示，级配曲线见图 1。

Table 4. Composition of asphalt mixture gradation

表 4. 沥青混合料级配组成

筛孔尺寸(mm)	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
合成级配	100.0	98.8	89.6	76.6	58.6	36.9	25.0	19.6	12.1	9.6	7.0	4.8
级配上限	100.0	100.0	92.0	80.0	72.0	56.0	44.0	33.0	24.0	17.0	13.0	7.0
级配下限	100.0	90.0	78.0	62.0	50.0	26.0	16.0	12.0	8.0	5.0	4.0	3.0
级配中值	100.0	95.0	85.0	71.0	61.0	41.0	30.0	22.5	16.0	11.0	8.5	5.0

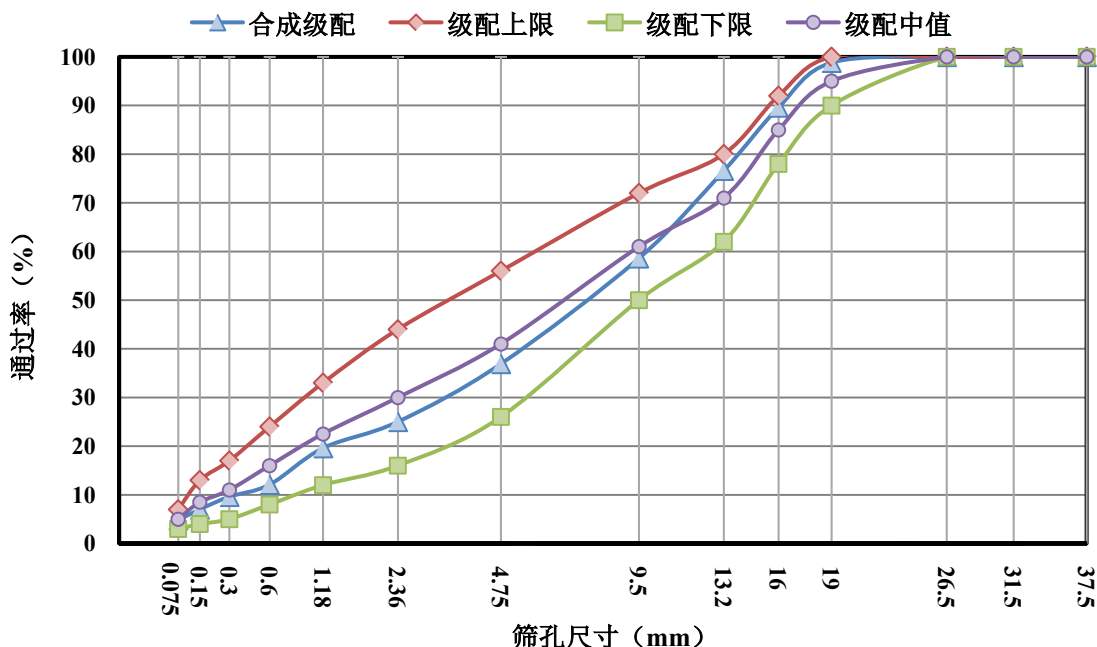


Figure 1. Asphalt mixture gradation curve
图 1. 沥青混合料级配曲线

3.2. 最佳沥青用量确定

根据工程经验以 5.0 为初始沥青用量，以 0.3%为间隔上下各浮动两个沥青用量进行胶粉沥青混合料马歇尔试验，混合料成型温度控制为 170℃，并测试混合料马歇尔试件体积指标如表 5 所示。

Table 5. Marshall specimen volume index
表 5. 马歇尔试件体积指标

沥青含量(%)	理论最大相对密度	试件毛体积相对密度	空隙率(%)	矿料间隙率(%)	沥青饱和度(%)	稳定度(kN)	流值(mm)
4.4	2.613	2.442	6.5	14.6	55.4	10.31	2.5
4.7	2.6	2.450	5.8	14.6	60.5	11.79	2.7
5.0	2.588	2.479	4.2	13.9	69.7	12.33	3.1
5.3	2.575	2.481	3.7	14.1	74.0	11.79	3.4
5.6	2.563	2.492	2.8	14.0	80.1	10.84	3.9
技术要求	-	-	3.0~6.0	≥13.0	65.0~75.0	≥8.0	2.0~4.0

基于图解法确定胶粉沥青混合料最佳沥青用量如图 2、图 3 所示。

根据图 2 取混合料毛体积密度最大值对应的沥青用量 a_1 、沥青饱和度中值对应的沥青用量 a_2 、目标空隙率对应的沥青用量 a_3 、马歇尔稳定度最大值对应的沥青用量 a_4 ，由(式 1)计算混合料最佳沥青用量初始值 OAC_1 。

$$OAC_1 = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{4} = \frac{5.6 + 5.1 + 5.0 + 5.0}{4} = 5.2 \quad (式 1)$$

根据图 3 取均符合技术标准的沥青用量 OAC_{min} 和 OAC_{max} 由(式 2)计算最佳沥青用量 OAC_2 。

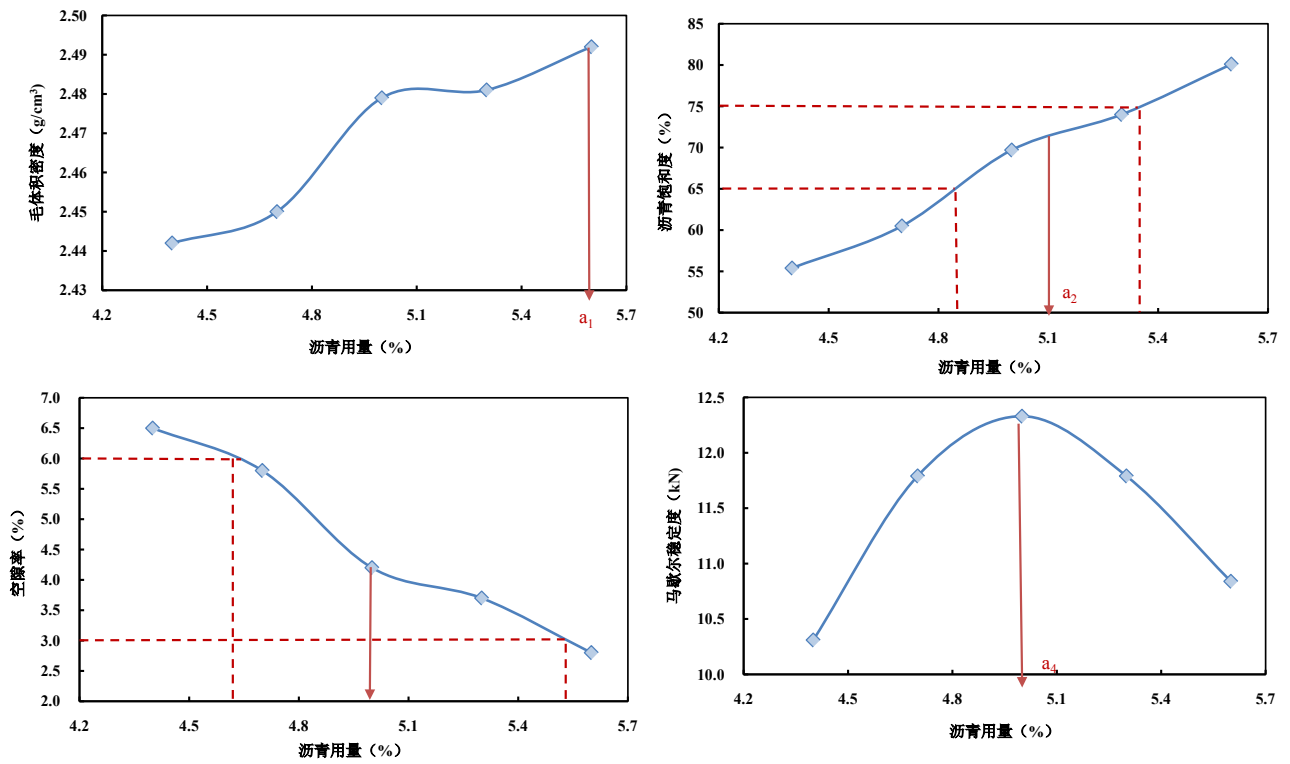


Figure 2. OAC₁ analysis diagram of the initial value of the optimal asphalt dosage
图 2. 最佳沥青用量初始值 OAC₁ 分析图

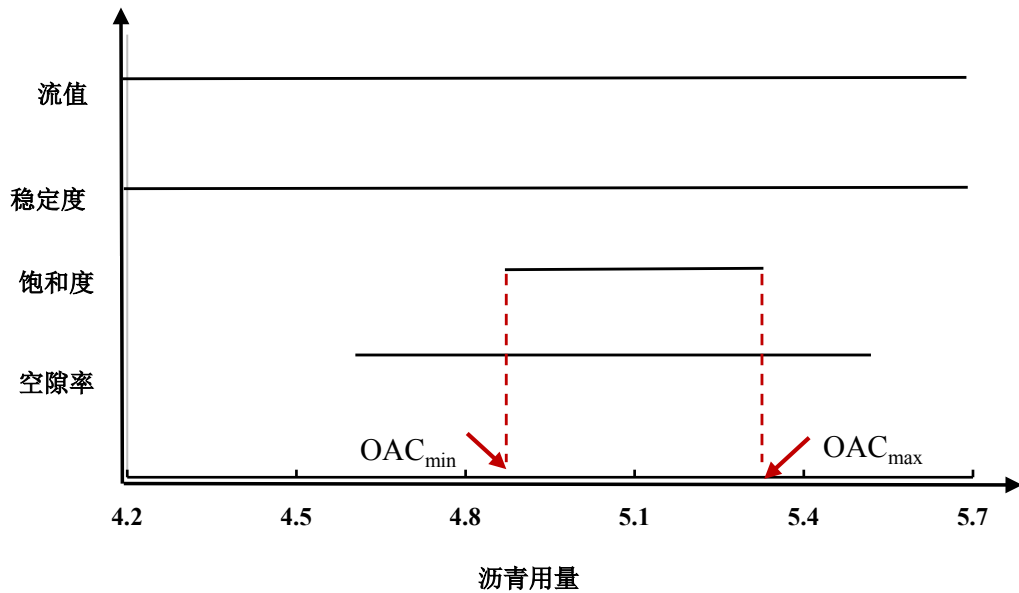


Figure 3. OAC₂ analysis diagram of optimal asphalt dosage
图 3. 最佳沥青用量 OAC₂ 分析图

$$OAC_2 = \frac{OAC_{min} + OAC_{max}}{2} = \frac{4.9 + 5.3}{2} = 5.1 \quad (式 2)$$

根据上式确定的 OAC₁ 和 OAC₂ 综合确定胶粉沥青混合料的最佳沥青用量为 5.1。

3.3. 混合料性能评价

为了进一步评价胶粉沥青混合料的路用性能，基于车辙试验、低温弯曲试验、冻融劈裂试验和浸水马歇尔试验分别对胶粉沥青混合料的高温性能、低温性能和水稳定性进行评价，试验结果如表 6~8 所示。

Table 6. Results of mixture rutting test

表 6. 混合料车辙试验结果

试件编号	时间 t_1 时的 变形量 mm	时间 t_2 时的 变形量 mm	变形量之差 mm	动稳定度次/mm		标准差次/mm	变异系数%
				单值	平均值		
1	1.643	1.761	0.118	5339			
2	1.532	1.657	0.125	5040	5195	149.82	2.88
3	1.613	1.734	0.121	5207			
动稳定度规定值，次/mm				>2400			

Table 7. Low temperature bending test results of the mixture

表 7. 混合料低温弯曲试验结果

试件编号	1	2	3	4	平均值	技术要求
破坏应变($\mu\epsilon$)	3183.9	3275.4	3112.1	3221.8	3198.0	≥ 2800

Table 8. The results of the water stability test of the mixture

表 8. 混合料水稳定性试验结果

试验项目	浸水马歇尔试验			冻融劈裂试验		
	未浸水马歇尔 稳定度(kN)	浸水马歇尔 稳定度(kN)	残留稳定度(%)	未冻融劈裂强度 (MPa)	冻融劈裂强度 (MPa)	冻融劈裂强度比 (%)
试验结果	13.07	11.7	89.5	0.85	0.73	85.9
技术要求	-	-	$\geq 80\%$	-	-	$\geq 75\%$

基于上述研究表明，胶粉沥青混合料的高温性能、低温性能及水稳定性均满足行业标准《公路沥青路面施工技术规程》JTG F40-2004 技术要求，可广泛应用于道路工程。

4. 沥青混合料施工工艺

4.1. 胶粉/SBS 复合改性沥青制备

由于沥青中添加了胶粉及 SBS 外加剂，存放及运输过程中易导致改性沥青发生离析现象，所以本项目采用拌合站现场改性的方法。胶粉/SBS 复合改性沥青制备工艺：1) 对基质沥青、胶粉、SBS 改性剂等材料指标进行检测，保证原材料技术指标满足规范要求；2) 将沥青升温至 180℃，将一定质量的胶粉和 SBS 改性剂加入到沥青中预混并搅拌；3) 将搅拌均匀的混合沥青通过胶体磨进行研磨；4) 将研磨后的沥青泵入发育罐并添加 0.1% 稳定剂继续发育 2~3 小时，发育罐温度控制为 180℃~185℃；5) 取代表性样品进行相关试验，保证现场改性沥青满足相应规范的技术要求。胶粉/SBS 复合改性沥青制备工艺如图 4 所示。

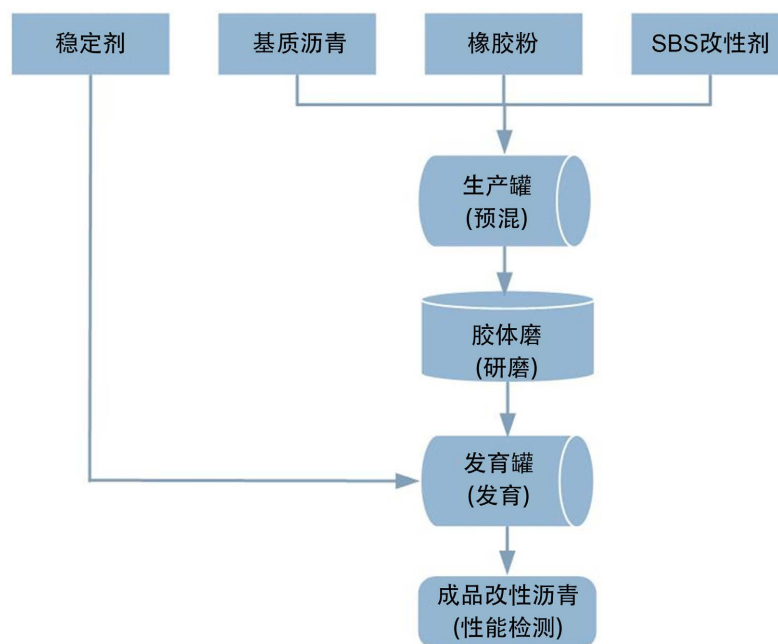


Figure 4. Preparation process of rubber powder/SBS composite modified asphalt
图 4. 胶粉/SBS 复合改性沥青制备工艺

4.2. 混合料施工工艺

合理的施工工艺及严格的施工质量控制是保证工程质量的关键，混合料施工包括施工前的准备、拌和、运输、摊铺、压实、施工质量验收等工序。对于胶粉/SBS 复合改性沥青混合料由于其粘度较大，混合料施工过程中应适当提高施工温度，施工温度控制如表 9 所示。

Table 9. Construction temperature control of rubber powder/SBS composite modified asphalt mixture
表 9. 胶粉/SBS 复合改性沥青混合料施工温度控制

施工工序	施工温度控制(°C)
胶粉/SBS 复合改性沥青加热温度	175~180
集料加热温度	185~195
混合料出厂温度	180~185
运输到现场温度	≥175
摊铺温度	≥165
初压温度	≥155
复压温度	≥140
碾压终了温度	≥110
开放交通温度	≤50

胶粉/SBS 复合改性沥青混合料拌和应采用间歇式拌和设备，为保证混合料拌和均匀应适当延长拌合时间，混合料拌合时间宜控制为 55~65 s，其中干拌时间不宜低于 10 s，湿拌时间不宜低于 45 s，保证集料颗粒被沥青均匀裹覆，混合料无花白料、结团等现象发生。

合理选择压实机械组合及压实工艺是保证沥青混合料施工质量的关键，胶粉/SBS 复合改性沥青混合

碾压对温度更加敏感，初压选择双钢轮压路机紧跟摊铺机在较短的工作面内完成混合料的表面压实，减少热量的散失。复压选择重型(≥26t)胶轮压路机碾压 5~6 遍，尽量减小复压与初压的时间间隔，以保证混合料在较高温度下完成碾压，进一步提高混合料的密实性。终压选择双钢轮压路机静压 2 遍进行收面，消除路面轮迹带，保证路面达到良好的平整度。

4.3. 施工质量检测

基于钻芯取样、摆式摩擦、铺砂法、渗水系数试验等测试方法对完工后路面的压实度、厚度、摩擦系数、构造深度、渗水系数等关键指标进行现场检测，试验结果如表 10 所示。

Table 10. On-site test results of rubber powder/SBS composite modified asphalt pavement

表 10. 胶粉/SBS 复合改性沥青路面现场检测试验结果

检测点	厚度(cm)	毛体积密度(g/cm ³)	压实度(%)	空隙率(%)	摩擦系数	构造深度	渗水系数(ml/min)
1	7.2	2.461	99.3	4.8	79	0.68	52
2	6.9	2.473	99.8	4.3	73	0.71	37
3	7.1	2.481	100.1	4.0	82	0.65	46
4	7.0	2.486	100.3	3.8	80	0.63	51
5	6.9	2.471	99.7	4.4	75	0.67	32
平均值	7.0	2.474	99.8	4.2	77.8	0.69	43.6
标准差	0.12	0.01	0.35	0.33	3.31	0.03	7.86

由上述实验可知，胶粉/SBS 复合改性沥青混合料施工质量检测结果均满足《公路路基路面现场测试规程》JTG 3450-2019 技术要求。

为了检验胶粉/SBS 复合改性沥青混合料的路用性能，在施工路段随机钻取代表性芯样进行汉堡车辙试验，试验结果如图 5 所示，芯样试验前后表面变化如图 6 所示。

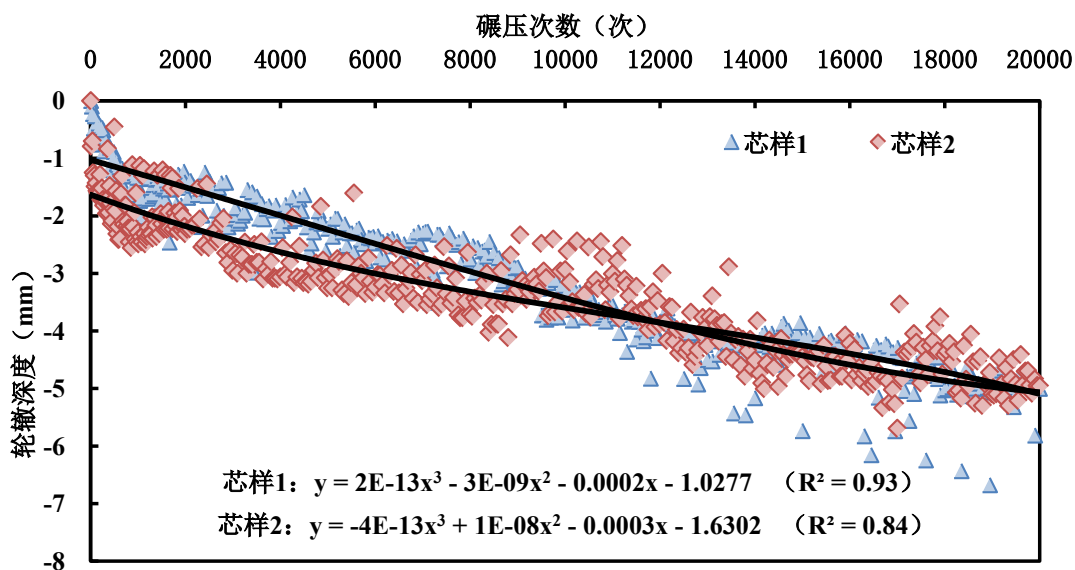


Figure 5. Deformation curve of Hamburg wheel track test

图 5. 汉堡轮辙试验变形曲线



Figure 6. Surface changes of core samples before and after the Hamburg rutting test
图 6. 汉堡车辙试验前后芯样表面变化

对于汉堡轮辙试验, 美国国家沥青中心基于密级配沥青路面的水损害及车辙病害与汉堡轮辙试验相关性的研究结果, 建议混合料试件在碾压 10,000 次时最大变形深度不应超过 4 mm, 碾压 20,000 次时最大变形深度不应超过 10 mm。由上述试验可知, 规定试验条件下混合料变形量均小于规范要求, 由变形曲线可知, 混合料无明显剥落点, 表明胶粉/SBS 复合改性沥青混合料具有良好的高温稳定性和抗水损害能力。

5. 总结

- 1) 对工程所用沥青、集料、矿粉等原材料进行检测, 各项技术指标均满足相关规范要求。
- 2) 基于马歇尔试验法确定胶粉/SBS 复合改性沥青混合料的最佳沥青用量为 5.1, 最佳沥青用量条件下混合料的高温性能、低温性能和水稳定性均满足规范要求。
- 3) 明确了胶粉/SBS 复合改性沥青制备方法, 确定了混合料施工工艺, 对混合料施工现场进行现场检测, 各项指标均满足相关规范要求。
- 4) 对路面芯样进行汉堡车辙试验, 混合料变形深度均满足规范要求, 变形曲线无明显剥落点, 混合料具有良好的高温稳定性和抗水损害能力。

参考文献

- [1] 杨博, 王笑风, 万晨光, 刘鑫. 干拌直投胶粉改性沥青混合料高温性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2020, 44(5): 933-937, 942.
- [2] Arabani, M., Tahami, S.A. and Hamed, G.H. (2018) Performance Evaluation of Dry Process Crumb Rubber-Modified Asphalt Mixtures with Nanomaterial. *Road Materials and Pavement Design: An International Journal*, **19**, 1241-1258. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1302356>
- [3] 肖飞鹏, 王涛, 王嘉宇, 等. 橡胶沥青路面降噪技术原理与研究进展[J]. 中国公路学报, 2019(4): 19.
- [4] Rath, P., Gettu, N., Chen, S., et al. (2021) Investigation of Cracking Mechanisms in Rubber-Modified Asphalt through Fracture Testing of Mastic Specimens. *Road Materials and Pavement Design*, 1-20. <https://doi.org/10.1080/14680629.2021.1905696>
- [5] 董大伟, 凌天清, 江宽, 陈林, 张立群. 废轮胎橡胶粉在高黏改性沥青中的应用性研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(1): 78-84, 91.
- [6] Sienkiewicz, M., Borzędowska-Labuda, K., Zalewski, S., et al. (2017) The Effect of Tyre Rubber Grinding Method on the Rubber-Asphalt Binder Properties. *Construction and Building Materials*, **154**, 144-154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.170>
- [7] Leng, Z., Padhan, R.K. and Sreeram, A. (2018) Production of a Sustainable Paving Material through Chemical Recycling of Waste PET into Crumb Rubber Modified Asphalt. *Journal of Cleaner Production*, **180**, 682-688. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.171>

-
- [8] Ling, T., Lu, Y., Zhang, Z., *et al.* (2019) Value-Added Application of Waste Rubber and Waste Plastic in Asphalt Binder as a Multifunctional Additive. *Materials*, **12**, Article No. 1280. <https://doi.org/10.3390/ma12081280>
- [9] Zhang, F., Li, J., Yaseen, M., *et al.* (2018) Preparation Methods and Performance of Modified Asphalt Using Rubber—Plastic Alloy and Its Compounds. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **30**, Article ID: 04018163. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002356](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002356)
- [10] Yan, K., Xu, H. and You, L. (2015) Rheological Properties of Asphalts Modified by Waste Tire Rubber and Reclaimed Low Density Polyethylene. *Construction & Building Materials*, **83**, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.092>
- [11] Jiang, Z., Easa, S.M., Hu, C., *et al.* (2019) Understanding Damping Performance and Mechanism of Crumb Rubber and Styrene-Butadiene-Styrene Compound Modified Asphalts. *Construction and Building Materials*, **206**, 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.061>
- [12] 魏永政. 化学活化胶粉改性橡胶沥青的流变特性研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2019
- [13] 李关龙. SBS/废胶粉复合改性沥青性能的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 华东理工大学, 2016.
- [14] 胡长远, 王小萍, 贾德民. 胶粉的改性及其在聚合物和沥青材料中的应用[J]. 高校化学工程学报, 2020, 34(1): 214-221.
- [15] 刘勇, 顾兴宇, 李志刚, 等. 胶粉/SBS 复合改性沥青性能评价及改性机理[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019,40(1): 108-113.
- [16] 王笑风, 吕小武, 褚付克, 等. 不同类型橡胶粉与 SBS 复合改性沥青的性能特征分析[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3695-3702.