

# 胶粉复合改性沥青指标优化及应用

杜闯<sup>1</sup>, 卢善桐<sup>2</sup>

(1. 中交第一航务工程局有限公司; 2. 中交一航局第二工程有限公司)

**摘要:** 为提高 SBS 改性沥青工作性能, 降低施工成本, 对胶粉复合改性沥青工作机理进行研究, 提出优化胶粉沥青各材料掺配比例方案, 分析胶粉掺量对胶粉沥青性能的影响, 确定胶粉最佳掺量, 并以广西浦北至北流高速公路路面工程为基础进行试验研究, 验证了提出的复合改性沥青混合料配比设计方法, 总结了施工效果及应用效益, 对胶粉复合改性沥青混合料在广西地区推广应用具有指导性。

**关键词:** 胶粉沥青; 掺配比例; 沥青性能; 路面应用

## 0 引言

作为一种新型的道路建筑材料, 复合改性沥青(又称胶粉复合沥青)在提高高低温性能、改善疲劳性能以及降低噪音、保护环境等方面具有优势, 不仅可以改善沥青路面的使用性能, 而且可以缓解废旧轮胎对环境造成的压力, 具有很好的发展前景。

市场上常见的成品 SBS 改性沥青中基质沥青重量占比约为 96%, 作为基础原材料, 基质沥青的组分比例决定了改性沥青的组分构成, SBS 作为改性剂, 其分子量高低及掺配比例决定了结构中官能团间连接力的大小, 直接影响改性沥青的结构稳定, 并客观地反映在技术指标的变化上。改性沥青生产厂家处于改性沥青产业链的下游, 其产品质量不仅取决于自身加工过程的管控, 且受上游原材料质量波动影响。目前 SBS 改性沥青原材进场技术指标均能满足设计及规范要求, 但高温存储 48 h 后其技术指标会出现不同程度的衰减下降, 需加强其结构稳定性。

传统 SBS 改性沥青为网状镶嵌结构, 目前国内 SBS 改性沥青相的组成基本都是传统的沥青相为主, 丁苯橡胶填充为辅; 而国外推广的深度改性沥青工艺, 实际上是选择分子量较大的 SBS 产品, 同时增加 SBS 掺量, 在宏观上增加改性沥青中胶粉含量的同时, 改变相的主次组成, 即丁苯橡胶相为主相, 沥青为辅助填充。由于该工艺受国内设备、材料及经济成本影响较大, 目前未进行推广。

本文以在建高速公路的路面工程为例, 分析

复合改性沥青原理, 并参考行业内相关案例和标准, 通过生产试验验证其工作性能、分析试验结果和应用效益, 对胶粉沥青各材料的掺配比例进行优化, 以期对复合改性沥青混合料的施工和应用进行有效指导。

## 1 项目概况

广西壮族自治区玉林市浦北至北流高速公路路面绿化二标, 起止桩号为 K35—K78, 线路全长 43.972 km(含长链), 其中包含 2 处枢纽互通、3 条互通连接线、3 条隧道。铺装沥青混合料项目总工程量 44.6 万 t, 其中 70 号基质沥青需求量 5 484 t, SBS 改性沥青需求量 14 180 t。

选择浦北至北流高速公路博白南 L、M 连接线路段落应用复合改性沥青开展试验研究并总结相关成果。

## 2 技术原理

胶粉沥青的改性机理一般有物理共混、网络填充和化学共混 3 种。物理共混是指胶粉加入到沥青中后, 受到机械力的作用而均匀分散到沥青中, 同时胶粉颗粒在沥青中轻质组分的作用下发生溶胀, 在沥青中形成共混体系, 在分散和溶胀过程中只有物理作用。胶粉在沥青中的网络填充是指胶粉受到沥青中的轻质组分的作用而被分开, 发生溶胀和部分溶解过程, 胶粉分子自由基相互结合和交联, 形成松散的网络结构而存在于沥青基体中。胶粉与沥青的化学共混是指在沥青中存在着的烷属烃、烯属烃、芳香烃、极性和非极性化合物、羟基等有机官能团, 可以和许多物质发生化学反应, 产生化学交联或化学加成, 生成新

的化学键<sup>[1]</sup>。

由于废胎胶粉成分复杂,在高温下胶粉与沥青混合成胶沥青,两者之间的相互影响是非常复杂的。这3个过程都有可能存在,只是程度不同。以细分散为主,主要通过物理共混作用实现胶粉在热沥青中的理想状态<sup>[2]</sup>。

溶胀反应和脱硫反应主要发生在热基质沥青中的废胎胶粉中。溶胀过程表现为胶粒体积扩大(扩大后体积比扩大前增大3~5倍),沥青黏度增大。脱硫工艺是指在高温下,硫化胶中的C-S-C交联键发生断裂,脱硫使橡胶沥青在制备过程中不间断地进行脱硫,使沥青的黏度降低,胶粉颗粒失去弹性,其脱硫程度显著影响橡胶沥青的性能。橡胶沥青的制备过程是寻找胶粉的溶胀和脱硫平衡点,在此平衡点上,在脱硫作用发生最小的同时,胶粉得到充分溶胀,从而使沥青的高、低温性能,弹性恢复和温感性能得到全面提高。综合而言,废胎胶粉对基质沥青的改性作用主要包括以下3点:

1) 结构性改性

在热沥青中加入废胎胶粉,先将沥青(芳香分、饱和分、石蜡等)中的轻组分吸收,使胶粒溶化膨胀<sup>[3]</sup>。沥青的高温性能和温度敏感性得到提高,溶胀过程使沥青胶体结构发生变化,由溶胶型转变为溶-凝胶型,其溶胀过程使沥青中轻组成分含量有效降低。

2) 增强性改性

在沥青中均匀分布着大量的、粒径较小的橡胶颗粒,在低温下产生与沥青基体模量不同的橡胶粉末颗粒,内部胶份填充过多,引起交联密度变大,使沥青抗冲击性能和低温韧性得到提高。由此可知,橡胶在沥青中的作用是增强黏性。

3) 相容性改性

橡胶粉和沥青属于热力学相容性较差的系统,在分子质量和化学组的划分上有很大的差异。沥青中橡胶粉的理想状态是均匀分布而非完全溶解,均匀分布的胶粒在沥青中吸收轻质组成分,形成稳定的体系,与沥青不相离。该系统中,沥青性能在不同相位界面上的相互影响得以提升。

3 技术方案及分析

复合改性沥青技术方案包括:原材料选择、胶粉沥青制作、SBS改性沥青制作、复合改性沥青制作。

3.1 原材料选择

原材料选择主要包括:基质沥青品牌型号及技术指标、SBS改性剂种类品牌及技术指标、胶粉种类及技术指标、其他添加剂选择。

3.2 胶粉沥青制作

参考行业相关案例和标准,制定了胶粉沥青各材料掺配比例方案,选取掺量分别为15%、20%、24%的40目胶粉,分别对胶粉沥青的软化点、延度、针入度等指标进行测定,分析胶粉沥青掺量对胶粉性能的影响程度,确定胶粉沥青的软化点、延度,最后确定胶粉沥青的用量,并确定胶粉的最佳用量。胶粉沥青掺配方案对应试验数据见表1。

表1 胶粉沥青掺配方案对应试验数据

方案	掺配方案	5℃延 伸度/cm	软化 点/℃	针入 度	180℃旋 转黏度/ Pa·s
1	胶粉:70号基质沥青=15%:85%	37.4	58.7	63.5	1.8
2	胶粉:70号基质沥青=20%:80%	26.8	82.7	53.7	3.2
3	胶粉:70号基质沥青=24%:76%	19.8	88.6	35.2	5.8

综合上述方案的试验指标和经济比选,选择方案2胶粉:70号基础沥青=20%:80%进行下一步优化。

3.3 SBS改性沥青制作

采用母液法(高浓度SBS浓缩液稀释)进行SBS改性沥青加工,母液浓度为10%(内掺),产量30t/h,成品SBS改性沥青SBS含量为4%(内掺)。

3.4 复合改性沥青制作

胶粉沥青与SBS改性沥青按比例掺配生产,分别在50%:50%,40%:60%,30%:70%的比例下测定复合改性沥青的软化点、延度、针入度等,复合改性沥青掺配方案对应试验数据见表2。

表2 复合改性沥青掺配方案对应试验数据

方案	掺配方案	5℃延 伸度/cm	软化 点/℃	针入 度	180℃旋 转黏度/ Pa·s
1	胶粉沥青:SBS改性沥青=50%:50%	33.2	76.5	56.7	2.1
2	胶粉沥青:SBS改性沥青=40%:60%	25.6	83.2	45.2	2.4
3	胶粉沥青:SBS改性沥青=30%:70%	18.7	83.4	41.2	3.7

综合上述方案的试验指标和经济比选,选择方案1进行加工生产。

3.5 生产试验验证

根据上述方案进行了优化后的 SBS 改性沥青指标检测和混合料高温性能验证, 试验参照中面

层 AC-20C 沥青混合料生产配合比, 分别采用 4.0%、4.3%这 2 种油石比制作车辙板试件, 进行高温稳定性试验, 试验温度 60℃, 试验结果见表 3。

表 3 优化后的复合改性沥青试验结果

试验项目	技术指标	优化前 SBS 改性沥青指标			优化后 SBS 改性沥青指标		
		第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 1 天	第 2 天	第 3 天
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	40~60	57.0	57.8	60.5	54.4	55.2	55.5
延度(5℃)/cm	≥20	27.2	26.4	22.1	34.2	33.8	32.2
软化点(环球法)/℃	≥75	81.8	80.1	78.4	87.8	86.4	85.6
85 型老化延度/cm	≥15	15.2	13.5	13.2	25.3	24.8	23.2
弹性恢复(25℃)/%	≥75	87	85	80	90	91	92
动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	≥4 000	4 996(4.0%油石比); 5 142(4.3%油石比)			5 575(4.0%油石比); 6 116(4.3%油石比)		

由表 3 分析可知:

1) 优化方案有助于增强现有 SBS 改性沥青指标的稳定性, 体现在三大指标老化衰减幅度更小, 特别是老化后的延度指标及衰减幅度更小, 使其具有更好的弹性恢复能力, 能够延长路面的使用寿命。

2) 优化后的 SBS 改性沥青三大指标更加稳定, 大量的橡胶粉消耗实现了环保, 复合改性取代部分 SBS 改性沥青实现了经济节约。

4 生产方案

目前, 复合改性沥青混合料生产方法有干法和湿法 2 种, 浦北至北流高速公路路面工程选择湿法工艺生产复合改性沥青。

4.1 材料

废胎胶粉选用常温粉碎的斜交胎或子午胎胶

粉, 胶粉颗粒粒径选择 40 目, 相关技术指标应符合表 4 规定。

基质沥青选用 A 级 70 号道路石油沥青, 改性沥青选择 SBS 改性沥青, 技术指标满足表 5 沥青技术要求。

表 4 废胎胶粉的技术指标

检测项目	技术指标	进场检测结果	试验标准
水分/%	<1	0.36	GB/T 19208—2020 《硫化橡胶粉》
相对密度	1.10~1.30	1.18	JT/T 797—2019 《路用废胎橡胶粉》
金属含量/%	<0.05	0	
纤维含量/%	<1	0.05	
灰分/%	≤ 8	3.6	GB/T 14837.1—2014 《橡胶和橡胶制品热重分析法测定硫化胶和未硫化胶的成分第 1 部分》
丙酮抽出物含量/%	≤ 20	14.7	
炭黑含量/%	≥ 28	40.5	
门尼黏度/%	≤ 40	26.2	
橡胶烃含量/%	≥ 42	48.2	

表 5 沥青技术要求

检测项目		70 号 A 级道路石油沥青	进场检测结果	SBS 改性沥青	进场检测结果	胶粉复合改性沥青	进场检测结果
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm		60~70	67	40~60	55	50~80	63
针入度指数 PI		-1.5~+1.0	—	≥0	—	≥0	—
延度(5 cm/min)/cm		10℃时, ≥15	26.2	5℃时, ≥20	26.5	5℃时, ≥20	26.3
软化点(环球法)/℃		≥46	48	≥75	84	≥75	83.2
闪点(COC)/℃		≥260	—	≥230	—	≥230	—
溶解度(三氯乙烯)/%		≥99.5	—	≥99	—	≥99	—
含蜡量(蒸馏法)/%		≤2	—	—	—	—	—
密度(15℃)/(g·cm <sup>-3</sup> )		实测	—	—	—	—	—
动力黏度(60℃)/Pa·s		≥180	—	—	—	—	—
运动黏度(135℃)/Pa·s		—	—	≤3	—	≤3	—
储存稳定性离析(48 h 软化点差)/℃		—	—	≤2.5	—	≤2.5	—
弹性恢复(25℃, 10 cm)/%		—	—	≥75	78.3	≥85	88.7
薄膜烘箱或 旋转薄膜烘 箱老化试验	质量损失/%	≤±0.8	—	≤±1.0	-0.35	≤±0.6	0.32
	针入度比(25℃)/%	≥61	—	≥65	71.6	≥70	81.4
	残留延度/cm	10℃时, ≥6	—	5℃时, ≥15	16.7	5℃时, ≥15	17.3

4.2 生产工艺及流程

成套设备是由生产主机、预混罐、发育罐、热油炉、操作室、管道、阀门等组成的流水线生产装置。

生产流程为：基质沥青、胶粉经计量配比后送入主机预混罐里搅拌、混和→生产泵送至胶体

磨→发育罐发育→橡胶沥青泵入搅拌罐与 SBS 改性沥青混合发育→供拌使用或成品保存。

5 实体检测及分析

浦北至北流高速公路博白南 L、M 连接线段落应用胶粉复合改性沥青，实测项目及结果见表 6、表 7。

表 6 SBS 改性沥青混合料与胶粉复合改性沥青混合料性能指标对比

对比项目	SBS 改性沥青混合料		胶粉复合改性沥青混合料		设计要求
	实际生产指标	生产配合比指标	实际生产指标	生产配合比指标	
配合比	0~3 mm 细集料:3~6 mm 粗集料:6~11 mm 粗集料:11~18 mm 粗集料:18~24 mm 粗集料:矿粉=28:9:20:24:17:2		0~3 mm 细集料:3~6 mm 粗集料:6~11 mm 粗集料:11~18 mm 粗集料:18~24 mm 粗集料:矿粉=28:9:20:24:17:2		—
油石比/%	4.3	4.3	4.3	4.3	—
试件毛体积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.434	2.438	2.434	2.437	—
试件理论最大相对密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.545	2.548	2.544	2.549	—
空隙率/%	4.2	4.3	4.3	4.4	4~6
矿料间隙率/%	13.3	13.0	13.2	13.1	≥13
沥青饱和度/%	68.4	66.9	67.4	66.4	65~75
稳定度/kN	11.7	12.8	13.6	13.8	≥8
残留稳定度/%	90.2	91.8	92.3	92.4	≥85
流值/mm	2.4	2.6	2.5	2.7	1.5~4.0
动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	5 232	5 140	6 034	6 116	≥4 000
冻融劈裂强度/%	88.6	88.5	90.8	91.1	≥80
试件渗水系数/(ml·min <sup>-1</sup> )	44	46	42	40	≤100

表 7 SBS 改性沥青混合料与胶粉复合改性沥青混合料现场检测数据

检测项目	SBS 改性沥青混合料			胶粉复合改性沥青混合料			设计要求
	LK0+150	LK0+300	LK0+400	MK0+200	MK0+350	MK0+450	
取芯厚度/cm	5.9	6.1	6.3	6.1	6.0	6.3	6.0
芯样密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	2.423	2.425	2.421	2.430	2.432	2.429	—
室内压实度/%	99.4	99.5	99.3	99.8	99.9	99.8	≥97
现场压实度/%	95.1	95.2	95.0	95.5	95.6	95.5	≥93
现场空隙率/%	4.9	4.8	5.0	4.5	4.4	4.5	4~8
渗水系数/(ml·min <sup>-1</sup> )	62	88	92	66	72	58	≤150
弯沉代表值/mm	0.12			0.10			—
平整度/mm	0.932			0.920			≤1.0

6 效益分析

目前进场胶粉颗粒不均匀，膨胀系数较大，灰分、水分含量较大，造成加工困难，因此正常工艺下掺量无法达到目标比例。经多次试验检测并试生产，确定胶粉沥青中胶粉掺量为 20%时可以满足生产指标。

沥青市场价格波动较大，博白南 L、M 连接线试验段施工时各材料市场价格为：SBS 改性沥青 5 500 元/t；70 号基质沥青 5 000 元/t；40 目胶粉 3 060 元/t；此外，加工费 150 元/t、电费 30 元/t、加热费 80 元/t，合计 260 元/t。生产能力 150 t/d，加工工期 60 d，复合改性沥青总量约为 9 000 t。

结合原材胶份及 SBS 改性沥青情况,以施工拌和及检测数据为依托,推荐复合改性沥青比例为胶粉:70 号基质沥青:SBS 改性沥青=10%:40%:50%,满足施工需求,经济成本最佳。

经计算,9 000 t 复合改性沥青总体成本为 4 716.9 万元,同样数量 SBS 改性沥青采购成本 4 950 万元,累计盈余 233.1 万元。

## 7 结语

针对现有原材料结合复合改性沥青成熟加工工艺,系统开展现场橡胶改性沥青相关技术研究和加工生产。结论如下:

1) 优化方案有助于增强现有 SBS 改性沥青结构指标的稳定性,尤其是老化后的延度指标,提高了沥青混合料抗疲劳性能,使其具有更好的弹性恢复能力,能够延长路面的使用寿命。

2) 优化后的 SBS 改性沥青品质得到提升,经

济环保,高温稳定性满足设计及规范要求。

3) 对橡胶改性沥青受胶粉掺量及细度、SBS 掺量、发育温度、发育时间等因素的影响规律进行了系统研究,可对现场加工生产工艺进行优化。

4) 结合实体工程,修筑了复合改性沥青的试验路,验证了所提出的复合改性沥青混合料的配合比设计方法,总结了施工工艺,降本创效,有效指导了复合改性沥青混合料在广西地区的施工和应用。

## 参考文献:

- [1] 马晓燕. 橡胶沥青及橡胶沥青混合料性能影响因素研究[D]. 西安:长安大学,2012.
- [2] 庄文琴. 一种抗拉伸复合橡胶沥青混合料的制备方法: CN201910124754.0[P]. 2019-06-28.
- [3] 郭宇雷. 地毯式沥青混合料配合比设计及其性能评价研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2015.