

文章编号:1671-6833(2018)02-0067-06

废胎胶粉与 HDPE/SBS 三掺复合改性沥青性能研究

何 锐<sup>1,2</sup>, 黄 鑫<sup>2</sup>, 耿九光<sup>1,2</sup>, 陈华鑫<sup>2</sup>

(1. 甘肃省道面工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730030; 2. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘 要:** 为了改善普通胶粉改性沥青的性能缺陷, 本研究采用 SK-90# 基质沥青和 HDPE-SBS-废胎胶粉材料制备复合改性沥青, 选择 SBS 百分掺量、胶粉百分掺量、HDPE 百分掺量、剪切速度、剪切时间和剪切温度 6 个试验变量, 通过正交试验来探讨复合改性沥青的最佳改性参数, 并采用方差分析法对其针入度、软化点、5 ℃ 延度、黏度和弹性恢复率 5 种技术指标进行分析, 得出各变量对复合改性沥青性能的影响规律, 得到较优制备方案, 并对其性能进行了分析. 结果表明: SBS 掺量对软化点和弹性恢复率影响最大; HDPE 掺量对针入度影响较大; SBS 和 HDPE 掺量对延度都具有影响; 各改性剂掺量和剪切温度对旋转黏度的影响基本相同. 较优制备方案为: 改性剂 HDPE 百分掺量为 1.5%, SBS 百分掺量为 5%, 废胎胶粉百分掺量为 20%, 剪切温度 165 ℃, 剪切速率 4 500 r/min, 剪切时间 45 min. 较优制备方案下, 改性沥青的高温稳定性和低温抗裂性大大提高, 同时自身黏度增大使其与集料的黏附性增强, 提高了抗车辙能力和抗水损害能力; 较高的弹性恢复率保证了改性沥青的抗裂性能.

**关键词:** 复合改性沥青; 正交试验; 方差分析; SBS; 废胎胶粉; HDPE

**中图分类号:** U414      **文献标志码:** A      doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2018.02.006

0 引言

随着我国公路行业的发展和汽车数量的急剧增加, 对路面性能的要求也越来越高, 同时废旧轮胎的处理问题越来越严重. 据统计, 我国 2014 年前半年已产生超过 1 000 万吨废旧轮胎<sup>[1]</sup>. 采用废胎胶粉制备改性沥青不仅可以提高沥青路面的抗车辙和抗疲劳等性能<sup>[2-3]</sup>, 还可以缓解废旧轮胎对环境的污染<sup>[4]</sup>, 减少噪声并提高抗滑性<sup>[5-6]</sup>. 废胎胶粉由于热稳定性差而难以储存<sup>[7-8]</sup>, 其来源广泛更是导致改性结果参差不齐<sup>[9]</sup>. 为了在不降低路面性能的基础上节约成本, 很多学者对 PE/SBS 复合改性沥青混合料进行研究后发现, PE 和 SBS 复合改性可以较大地提高其高温性能、力学性能和抗水损害能力, 但低温性能和抗疲劳性能有所降低<sup>[10]</sup>. 废胎胶粉和 PE 复合改性沥青具有很高的储存稳定性<sup>[11]</sup>. 而 SBS 和废胶粉复合改性沥青的温度敏感性低, 具有良好的低温抗裂性, 提高了抗裂、抗车辙性能<sup>[12]</sup>.

3 种不同的改性剂虽然经过两两复掺可以改

善沥青的部分性能, 但仍然存在上述的一些缺陷. 因此, 为了达到既改善沥青性能又节约成本保护环境的目的, 本试验在前人研究的基础上尝试采用 HDPE、SBS、废胎胶粉三掺复合改性的方式, 以正交试验制备复合改性沥青, 通过方差分析和极差分析考察工艺参数和改性剂掺量对改性沥青性能的影响规律, 并得到较优的制备方案, 对进一步研究和应用具有积极意义.

1 试验部分

1.1 原材料

**基质沥青:** 本研究采用韩国 SK-90# 沥青作为基质沥青, 按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》测定针入度、软化点和延度, 主要技术指标如表 1 所示.

**SBS:** 本研究采用 YH-1310 热塑性丁苯橡胶 SBS.

**废旧胶粉:** 本研究采用粒径为 180 μm 的废旧胶粉, 由子午线轮胎采用常温粉碎法制备而成.

表 1 SK-90<sup>#</sup> 沥青指标

Tab. 1 The indicators of SK-90 <sup>#</sup> asphalt		
技术指标	实测值	规范值
25 ℃ 针入度/0.1 mm	96.0	80 ~ 100
软化点(环球法)/℃	47.2	≥42
5 ℃ 延度/cm	11.2	—

HDPE:本研究采用大庆石化出产的高密度聚乙烯 HDPE,物理性能如表 2 所示.

表 2 高密度聚乙烯 HDPE 的物理性能

Tab. 2 Physical properties of high density polyethylene HDPE				
指标	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	拉伸强 度/MPa	熔体流动速度/ (g·(10 min) <sup>-1</sup> )	断裂伸 长率/%
结果	0.951	24	0.95	500

1.2 试验方案

HDPE/SBS/废胎胶粉复合改性沥青由 3 种改性剂与基质沥青混合改性而成,在选择改性工艺时,应兼顾 3 种改性剂单一改性基质沥青的制备方法.考虑到胶粉改性沥青的“干法”和“湿法”改性方法,PE 改性沥青的直剪共混法、高速剪切法和胶体磨法<sup>[13-14]</sup>以及 SBS 改性沥青的溶胀、剪切、发育 3 阶段改性方法<sup>[15]</sup>.综合 3 类改性方法,结合现有仪器设备,确定改性工艺为溶胀、高速剪切、发育 3 个步骤<sup>[16]</sup>.拟定改性剂掺量与工艺参数 5 水平 6 因素表,如表 3 所示.

表 3 性能影响因素水平表

Tab. 3 Performance impact factor level table						
水平	SBS 掺量/ %	胶粉 掺量/ %	HDPE 掺量/ %	剪切 时间/ min	剪切 速率/ (r·min <sup>-1</sup> )	剪切 温度/ ℃
1	1	4	0.0	15	4 000	170
2	2	8	1.5	30	4 500	175
3	3	12	3.0	45	5 000	180
4	4	16	4.5	60	5 500	185
5	5	20	6.0	75	6 000	190

根据表 3 的正交因素水平表拟定试验方案,并确定实验步骤如下:保持沥青温度在 140 ℃ 左右以便取用;在 140 ℃ 下加入 SBS 和 HDPE 溶胀 10 min;在高速剪切时前 10 s 加入废胎胶粉后按照设定工艺参数进行高速剪切;剪切后放入烘箱中在 160 ℃ 下发育 1 h,制得复合改性沥青.

2 试验结果

按照前述试验方案和制备流程进行改性沥青的制备,各个评价指标测试结果整理如表 4

所示.

表 4 指标试验结果表

Tab. 4 Indicator test results table					
试验	25 ℃ 针 入度/ (0.1 mm)	5 ℃ 延 度/ cm	软化 点/ ℃	黏度/ (Pa·s)	弹性恢 复率/ %
1	69.2	11.2	47.2	0.9	15
2	54.9	12.9	51.1	2.8	14
3	50.1	6.9	62.6	3.3	27
4	46.2	11.0	57.0	11.7	34
5	45.6	9.0	67.2	15.6	24
6	55.3	7.7	79.2	1.9	28
7	44.4	14.0	55.9	5.5	33
8	43.7	10.3	64.9	8.5	24
9	42.5	5.6	72.8	24.1	40
10	62.7	5.5	83.9	6.5	41
11	36.1	13.7	62.6	4.1	38
12	47.1	5.0	63.1	7.6	14
13	37.2	6.8	83.8	32.3	51
14	50.0	5.5	96.9	14.0	48
15	51.7	19.8	79.2	25.7	54
16	55.0	17.4	67.8	4.4	52
17	38.3	26.4	68.4	28.0	48
18	57.2	7.1	90.4	5.8	46
19	49.9	26.0	66.3	34.6	58
20	48.6	18.0	86.2	30.8	49
21	37.4	18.1	92.5	31.4	53
22	51.4	7.3	93.1	9.5	60
23	51.1	35.0	77.2	29.3	55
24	55.2	21.5	86.4	14.2	55
25	51.2	20.8	92.7	55.4	58

3 性能指标评价分析

为了确定不同工艺参数和改性剂掺量对改性沥青性能的影响,得到复合改性沥青的较优制备方案,采用方差分析对试验结果进行考察.

3.1 针入度

针入度作为沥青性能三大指标之一,反映了沥青的软硬程度、稠度和黏结力等性能.根据正交试验结果对针入度进行方差分析,并对显著性因素进行极差分析,结果如表 5 和图 1 所示.自由度为 2 且临界值均确定,不再赘述.

由表 5 和图 1 可以看出,HDPE 掺量是影响复合改性沥青针入度的主要因素.随着 HDPE 掺量的增加,针入度总体呈现逐渐减小的趋势.这是因为 HDPE 本身属于弹性体,具有较高的刚性和韧性,因而随着掺量的增加,改性沥青整体的硬度也得到了提高.在 HDPE 掺量为 3.0% 和 4.5%

表 5 针入度方差分析表

Tab.5 Penetration variance analysis table			
因素	偏差平方和	$F$ 比	显著性
SBS 掺量	197.252	4.542	—
胶粉掺量	77.276	1.779	—
HDPE 掺量	886.492	20.411	显著
剪切时间	194.592	4.480	—
剪切速率	43.432	1.000	—
剪切温度	107.148	2.467	—

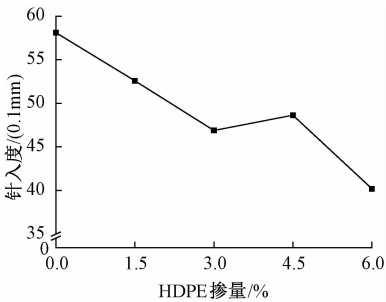


图 1 针入度随显著因素变化曲线

Fig.1 The penetration curve with the significant factor  
时,针入度出现基本相同的情况,这可能是受到其它工艺参数的影响导致的。

3.2 软化点

软化点也是沥青性能三大指标之一,反映了沥青的高温稳定性,分析结果如表 6 和图 2 所示。

表 6 软化点方差分析表

Tab.6 Softening point variance analysis table			
因素	偏差平方和	$F$ 比	显著性
SBS 掺量	2 576.033	8.840	显著
胶粉掺量	721.349	2.475	—
HDPE 掺量	618.553	2.122	—
剪切时间	345.317	1.185	—
剪切速率	291.381	1.000	—
剪切温度	330.864	1.135	—

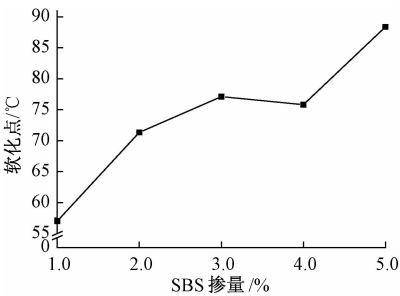


图 2 软化点随显著因素变化曲线

Fig.2 The softening point curve with the significant factor

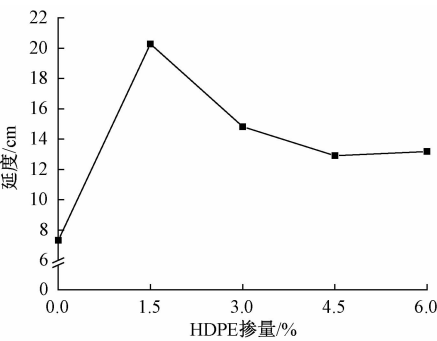
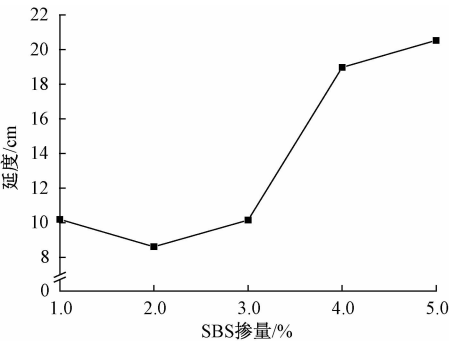
由表 6 和图 2 可以看出,SBS 掺量是影响复合改性沥青软化点的主要影响因素.随着 SBS 掺量的增加,软化点总体呈现上升的趋势.这是因为 SBS 作为一种高分子聚合物,其分子链行为可以随着温度变化而变化,当温度升高时,其分子链可以伸长发生流动,当温度降低时,又会交联重新缠绕形成网状结构.因此,SBS 的掺量越大,改性沥青的网状结构程度越高,整体的耐高温性能就越好.在 SBS 掺量为 3.0% 和 4.0% 时,软化点出现同针入度一样的特点,可能是由于其他工艺参数导致的。

3.3 延度

延度是反映沥青低温抗裂性的重要指标.分析结果如表 7 和图 3 所示。

表 7 延度方差分析表

Tab.7 Ductility variance analysis table			
因素	偏差平方和	$F$ 比	显著性
SBS 掺量	626.260	85.322	非常显著
胶粉掺量	7.340	1.000	—
HDPE 掺量	430.828	58.696	显著
剪切时间	13.516	1.841	—
剪切速率	203.020	27.659	—
剪切温度	218.828	29.813	—



(a) 延度随SBS掺量变化曲线 (b) 延度随HDPE掺量变化曲线

图 3 延度随显著因素变化曲线

Fig.3 The ductility curves with the significant factors

由表 7 和图 3 可以看出,SBS 掺量和 HDPE 掺量分别是影响复合改性沥青延度的主要影响因素和次要影响因素. 随着 SBS 掺量的增加,延度总体上呈增大的趋势.随着 HDPE 掺量增加,延度出现先增大后减小的趋势,结合 HDPE 对针入度的影响,复合改性沥青可能因为 HDPE 掺量的增加逐渐变硬从而失去延性,而 SBS 分子链本身的线性结构和弹性在低温时起到良好的抗拉作用,从而提高了改性沥青的低温性能.

3.4 旋转黏度

沥青的旋转黏度可以反映沥青在外力作用下抵抗变形的能力.当温度达到 150 ℃ 时,SBS 改性

沥青黏度与剪切速率无关<sup>[17]</sup>,因此试验采用布洛克菲尔德黏度计测定改性沥青在 135 ℃ 下的表观黏度,分析结果如表 8 和图 4 所示.

表 8 旋转黏度方差分析表  
Tab.8 Viscosity variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS 掺量	1 468. 990	23. 019	较显著
胶粉掺量	1 069. 794	16. 763	显著
HDPE 掺量	1 051. 006	16. 469	显著
剪切时间	222. 182	3. 482	—
剪切速率	63. 818	1. 000	—
剪切温度	729. 338	11. 428	显著

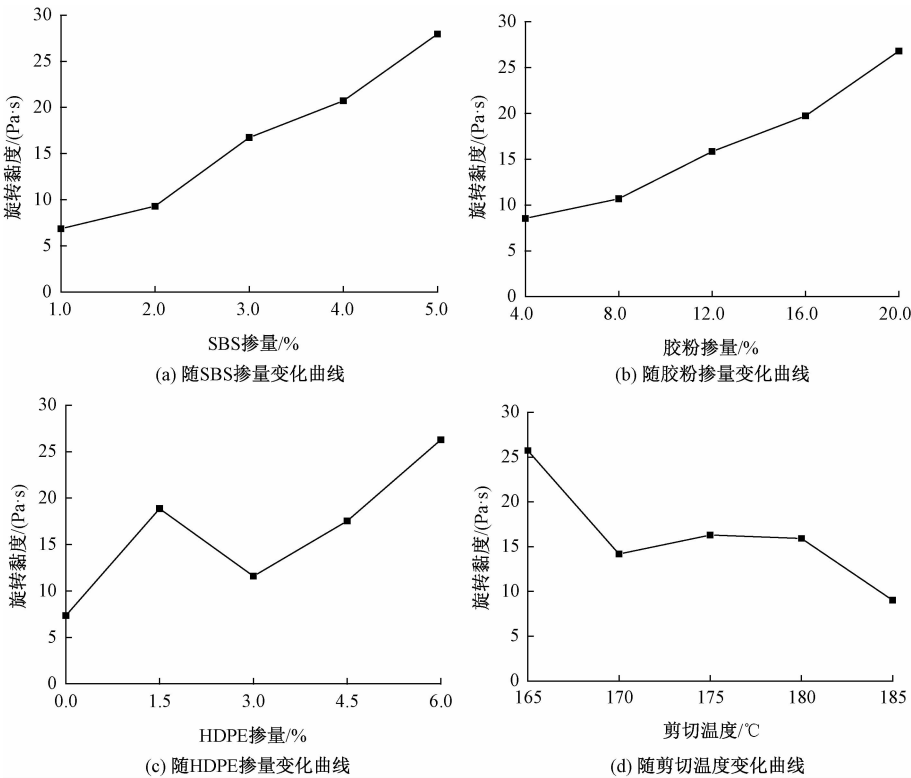


图 4 旋转黏度随显著因素变化曲线图

Fig.4 The rotational viscosity curves with the significant factors

表 8 和图 4 可以看出,改性剂的掺量和剪切温度对复合改性沥青的表观黏度都具有一定的影响,其中 SBS 掺量影响最大.随着各个改性剂掺量的增加,表观黏度总体上呈增大的趋势.但随着剪切温度的升高,表观黏度呈现不断下降的趋势.这是因为增加外掺剂掺量大大提高了改性沥青整体的稠度,而剪切温度提高则使外掺剂在制备过程中更容易溶解和剪切,从而降低了黏度.

3.5 弹性恢复率

弹性恢复率可以考察沥青内部体系的团聚力,评价其弹性恢复性能,分析结果如表 9 和图 5 所示.

表 9 弹性恢复率方差分析表

Tab.9 Elastic recovery rate variance analysis table

因素	偏差平方和	$F_{比}$	显著性
SBS 掺量	3 574. 960	28. 070	显著
胶粉掺量	598. 960	4. 703	—
HDPE 掺量	138. 560	1. 088	—
剪切时间	264. 560	2. 077	—
剪切速率	127. 360	1. 000	—
剪切温度	703. 810	5. 526	—

由表 9 和图 5 可以看出,SBS 掺量对复合改性沥青的弹性恢复率影响最大.随着 SBS 掺量的增加,弹性恢复率不断提高.改性沥青弹性恢复率

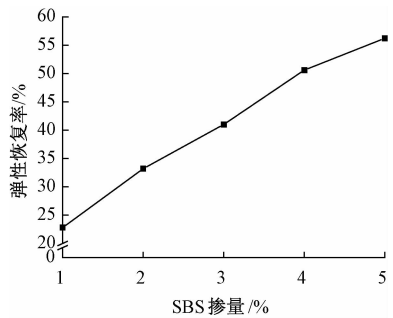


图5 弹性恢复率随显著因素变化曲线

Fig.5 The elastic recovery rate curves with the significant factors

的提高主要是因为 SBS 本身线性结构和弹性在拉伸过程中起到了抗拉和恢复作用。

综上所述,HDPE 掺量对复合改性沥青的针入度影响最大,HDPE 掺量越大,复合改性沥青针入度越低;SBS 掺量对复合改性沥青的软化点影响最大,且在试验掺量范围内,掺量越大软化点也越大. 以软化点为考察指标时,SBS 掺量应为 5.0%. SBS 和 HDPE 掺量共同影响复合改性沥青的延度,延度随 SBS 掺量的增加而增大,随 HDPE 掺量的增加先增大后减小. 以延度为考察指标时,SBS 掺量应为 5.0% 且 HDPE 掺量应为 1.5%. SBS 掺量对复合改性沥青的弹性恢复率的影响与软化点相同,掺量也应取 5.0%. 另外,各改性剂掺量以及剪切温度对旋转黏度有影响,胶粉掺量可取 20%,剪切温度可取 165 ℃. 与改性剂掺量相比,剪切时间对复合改性沥青性能的影响很小,从试验结果来看,剪切时间可取 45 min,剪切速率可取 4 500 r/min.

在较优制备方案下,HDPE/SBS/废胎胶粉三掺复合改性沥青的整体性能均有所提高,如表 10 所示. 其针入度大约在 55 左右,软化点在 90 ℃左右,具有良好的高温稳定性;同时 5 ℃延度不低于 20 cm,具有良好的低温抗裂性;旋转黏度在 20 Pa·s 左右,高温下优秀的抗变形能力使其抗车辙能力、与集料的黏附性以及抗水损害能力大大提高;弹性恢复率高达 60%,抗裂性能也得到提高.

表 10 较优制备参数条件下复合改性沥青性能表

Tab.10 Performance table for optimum preparation parameters

性能	针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	5 ℃延 度/cm	旋转 黏度/ (Pa·s)	弹性 恢复 率/%
较优方案	55	90	20	20	60

4 结论

(1)HDPE/SBS/废胎胶粉复合改性沥青制备工艺中各个工艺参数对其性能的影响均不相同,不能单独考虑某一因素或者以一个指标作为衡量标准.

(2)SBS 掺量对复合改性沥青的软化点和弹性恢复率影响最大;HDPE 掺量对复合改性沥青的针入度影响较大;SBS 和 HDPE 掺量都对复合改性沥青的延度有影响;各改性剂掺量和剪切温度对旋转黏度的影响基本相同.

(3)综上所述,得到较优制备方案为:改性剂 HDPE 掺量为 1.5%,SBS 掺量为 5.0%,废胎胶粉掺量为 20%,剪切温度为 165 ℃,剪切速率为 4 500 r/min,剪切时间为 45 min. 此时,改性沥青的高温稳定性、低温抗裂性、抗车辙能力和抗水损害能力得到提高.

(4)各改性剂掺量对复合改性沥青的影响比较大,使得工艺参数对其影响不够明显. 下一步可以在最佳掺量的基础上,抛开掺量对各个工艺参数进行研究.

参考文献:

[1] 王小龙. 废胶粉/SBS 双复合改性沥青及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院,2016.

[2] HAN L L, ZHENG M L, WANG C T, et al. Current status and development of terminal blend tyre rubber modified asphalt[J]. Construction and building materials, 2016(128): 399-409.

[3] WANG S F, CHENG D X, XIAO F P, et al. Recent developments in the application of chemical approaches to rubberized asphalt[J]. Construction and building materials, 2017(131): 101-113.

[4] 徐鸥明,张壮,杨晨,等. 胶粉掺量及存储时间对橡胶沥青技术性质的影响[J]. 中外公路, 2015, 35(5):273-275.

[5] 曹萍,单宝龙,王雷,等. 苯乙烯焦油对橡胶改性沥青性能的影响[J]. 精细石油化工, 2012, 29(2): 77-80.

[6] 程源. 废胶粉应用前瞻[J]. 合成橡胶工业, 2001, 24(2):65-66.

[7] 向丽. 废橡胶粉/SBS 复合改性沥青的机理和性能研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东)化学工程学院, 2011.

[8] 康爱红,肖鹏,马爱群. 废胶粉改性沥青存储稳定性研究[J]. 中外公路, 2007,27(3):205-207.

[9] 李关龙. SBS/废胶粉改性沥青性能的研究[D]. 上

海：华东理工大学化工学院，2016.

[10] 杨朋,张肖宁. PE 和 SBS 复合改性沥青混合料路用性能[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 40(10):4044-4049.

[11] 于凯,刘力,余强,等. 废轮胎胶粉和废 PE 复合改性沥青性能研究[J]. 环境工程学报,2010, 4(3): 690-692.

[12] 杨平文,杨元武,曹贵. SBS 复合改性橡胶沥青性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2015, 11(11):115-127.

[13] 程培峰,史书铨. HDPE 改性沥青试验室制备工艺及性能研究[J]. 中外公路,2014, 32(2):233-238.

[14] 田健君,杜群乐,李文清,等. 关于高密度聚乙烯改性沥青的几个问题[J]. 上海公路, 2011, 18(4): 57-59.

[15] 牛冬瑜,韩森,陈凯,等. 加工工艺关键参数对 SBS 改性沥青性能影响[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2014, 34(3):8-16.

[16] 史书铨. HDPE-胶粉改性沥青及其应力吸收层混合料性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学交通学院, 2014:14-26.

[17] 徐鸥明,韩森,牛冬瑜,等. 测试条件对 SBS 改性沥青表观黏度影响研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2015, 36(1):84-86.

Properties of Composite Modified Asphalt with HDPE/SBS/Waste Tire Powder Mixed

HE Rui<sup>1,2</sup>, HUANG Xin<sup>2</sup>, GENG Jiuguang<sup>2</sup>, CHEN Huaxin<sup>2</sup>

(1. Pavement Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou 730030, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To study the optimum preparation process of HDPE/SBS/waste tire powder mixed with three kinds of modified asphalt, SK-90 # asphalt was used to select SBS content, powder content, HDPE content and Shear rate, shear time and shear temperature to prepare compound modified asphalt. The results were analyzed by variance analysis method. The influence of each test variable on the performance of composite modified asphalt was obtained, and the optimal preparation scheme was obtained. The results showed that the SBS content had the greatest effect on the softening point and the elastic recovery rate. The content of HDPE had a great effect on the penetration. The SBS and HDPE content had an influence on the ductility. The content of the modifier and the shear temperature the effect of rotational viscosity was essentially the same. The optimum preparation scheme was as follows: the content of HDPE was 1.5%, the content of SBS was 5%, the content of waste tire was 20%, the shear temperature was 165℃, the shear rate was 4 500 r/min, the shear time was 45min. Under the optimal preparation scheme, the high temperature stability and low temperature crack resistance of the modified asphalt were greatly improved, and the viscosity of the modified asphalt was increased and the adhesion to the aggregate was enhanced, which improved the anti-rutting ability and the ability of resisting the water resistance. The elastic recovery rate could ensure the crack resistance of modified asphalt.

**Key words:** composite modified asphalt; orthogonal test; variance analysis; SBS; waste tire powder; HDPE