

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.01.002

复合改性沥青填缝料的性能优化方法

谭忆秋, 郭 猛, 曹丽萍, 李晓琳, 徐慧宁

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为了改善复合改性沥青填缝料的性能, 采用星点设计效应面法优化了原材料的最佳掺量。采用单因素分析方法确定了原材料掺量范围及加工工艺, 选用中心复合模型, 以针入度、弹性复原率、蠕变劲度、蠕变应变速率 m 值为指标进行试验分析, 建立了总评归一值的效应面, 以此确定各原材料掺量并进行了验证。试验结果表明: 原材料最佳掺量为橡胶粉 25%, 外掺剂 7%, SBS 5%, SBR 3%; 星点设计效应面优化法用于确定复合改性沥青填缝料原材料掺量取值范围可行、有效。

关键词: 道路工程; 填缝料; 星点设计效应面法; 复合改性沥青; 性能优化

中图分类号: U416.217.042

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 01-0011-07

Performance Optimization Method of Composite Modified Asphalt Sealant

TAN Yiqiu, GUO Meng, CAO Liping, LI Xiaolin, XU Huining

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150090, China)

Abstract: In order to improve the performance of composite modified asphalt sealant, the central composite design-response surface methodology was used to optimize the contents of raw materials. The content ranges of raw materials and processing technology were determined by single factor analysis method. Cone penetration, elastic recovery, creep strength, and m value of creep strain rate were analyzed by testing in central composite model. The response surface of the overall desirability was established, and the optimal contents of raw materials were determined and verified. The test results indicate that (1) the optimal contents of raw materials: rubber powder—25%, additive—7%, SBS—5%, and SBR—3%. Central composite design-response surface methodology is feasible and effective in optimization of the dosage of raw materials of composite modified asphalt sealant.

Key words: road engineering; sealant; central composite design-response surface methodology; composite modified asphalt; performance optimization

0 引言

表面开裂是路面的主要病害之一。由于环境温度、交通荷载等因素的影响, 路面中已有裂缝将会扩展, 在雨水的作用下, 对路面结构造成进一步的危害, 进而使道路结构逐渐丧失承载能力。因此, 及时地修补裂缝对道路的正常使用寿命有重要意义。

修补裂缝最常用的方式为灌入填缝料。吴葵等

人曾合成过单组分聚氨酯填缝料^[1]; 张东长等人曾研发出一种新型长寿命填缝材料, 其主要成分为有机硅^[2]; 寿崇琦等人曾致力于聚氨酯填缝料的研究, 并研制出有机硅改性聚氨酯预聚体及双组份聚氨酯填缝料, 随后结合聚氨酯填缝料和有机硅填缝料的优点制备了复合型填缝材料^[3]。国家“八五”计划后预制橡胶嵌缝条类材料发展了起来, 大多数采用氯丁橡胶制成。但是, 上述填缝料均各有缺点而不

收稿日期: 2011-06-10

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (2008BAG10B02); 国家自然科学基金项目 (51008099)

作者简介: 谭忆秋 (1968-), 女, 吉林德惠人, 教授, 博士研究生导师 (yiqiutan@163.com)

宜广泛使用^[4-5],如:聚氨酯类耐久性差;有机硅类虽然性能良好,但是价格昂贵;预制橡胶嵌缝条类容易从槽中跳出。在美国,常用的填缝料有橡胶沥青、PVC 煤沥青、聚硫化物、聚氨脂类(单组分和双组分)和硅橡胶等材料,其中橡胶沥青由于价格低且其变形能力和聚氨脂及硅橡胶相同而用量排名第一。

传统的改性沥青大多为不同的聚合物(如 PE、PP、SBS、SBR、EVA 等)单独改性沥青^[6-9],这些聚合物可以从不同的角度改善沥青的性能,如适量的 SBS 可改善沥青高温抗流动性;SBR 可以改善低温柔韧性;橡胶粉可以提高沥青的弹性等。但单一改性存在局限性,不能使改性沥青的总体性能得到全面提升,而复合改性沥青是目前研究的趋势。优异的复合改性沥青可以用来做道路填缝料。

复合改性沥青的改性剂由多种聚合物组成,这些聚合物在改善沥青性能的同时,相互之间也有影响^[10],因此需要用合理的试验设计方法对各改性剂的比例进行优化,达到综合提升沥青各项指标的目的。现有设计方法多为析因设计、均匀设计与正交设计,但析因设计所需要的试验次数多,耗费大量人力、物力和时间,当所考察的试验因素和水平较多时,研究者很难承受;均匀设计和正交试验设计方法虽然在试验处理时可以取得较佳点,但是它们还存在一些问题,如试验的精度不够,选择的试验取值仅仅是接近最佳取值,无法精确找到最佳点,条件优选凭经验,不能灵敏地考察各因素间的交互作用等等^[11-12]。目前国内外常用集数学和统计学方法于一体的星点设计效应面优化法进行试验设计,它具有试验次数少、试验精度高等特点。

本试验首次将星点设计-效应面优化法引入到复合改性沥青填缝料的制备方案优化中,对橡胶粉、SBS、SBR 和一种外掺剂的掺量进行了多目标优化,从而预测出各个因素的较佳范围,通过验证,制得了一种高弹性、低温性能良好的复合改性沥青填缝料。

1 材料与方法

1.1 基质沥青

基质沥青作为一种基本原材料起着至关重要的作用,本试验选取的是生产与使用较广泛的辽河 90[#] 基质沥青,其基本性能指标如表 1 所示。

表 1 辽河 90[#] 沥青物理性质

Tab. 1 Physical property of Liaohe Asphalt No. 90

项目	技术要求	试验结果	试验方法
针入度(100 g, 5 s, 25 °C) / (0.1 mm)	80 ~ 100	83.0	JTJ T0604
延度(5 cm/min, 10 °C) / cm	—	> 100	JTJ T0605
延度(5 cm/min, 15 °C) / cm	≥ 100	> 140	JTJ T0605
软化点 $T_{R&B}$ / °C	42 ~ 52	46.3	JTJ T0606
溶解度(三氯乙烯) / %	99.0	99.5	JTJ T0607
闪点(COC) / °C	230	310	JTJ T0609
密度(15 °C) / (g · cm ⁻³)	实测	1.009	JTJ T0603
含蜡量(蒸馏法) / %	≤ 3	1.5	JTJ T0615

1.2 SBS 粉末

本试验选取的 SBS 为台湾生产的星型 3411,其基本性能如表 2 所示。

表 2 SBS 物理性质

Tab. 2 Physical property of SBS

测试项目	比重	硬度 (shore A)	挥发物 含量 / %	丁二烯/ 苯乙烯	灰分 含量 / %	25% 甲苯 溶液粘度 (MPa · s)
测试数据	0.94	80	0.25	70/30	0.1	20 000

1.3 SBR 粉末

本试验采用的 SBR 粉末沥青改性剂,是在丁苯橡胶的基础上接枝苯乙烯等单体,专为沥青改性而生产的一种粉末丁苯橡胶产品,用以配合 SBS 粉末复合改性沥青,使其拥有更好的低温抗裂性与延展性,同时高温性能也得到增强,其技术指标见表 3。

表 3 SBR 物理性质

Tab. 3 Physical Property of SBR

项目	粒度 / 目	分子量 / 万	结合苯乙烯 / %	生胶门尼粘度 / [M · (1 + 4) 100 °C ⁻¹]
质量指标	≤ 40	20 ~ 30	21.5 ~ 35	48 ~ 66

1.4 橡胶粉与外掺剂

本试验采用的橡胶粉为经过标准方孔筛筛分得到的 50 ~ 100 目之间的部分。外掺剂是一种轻质油份。由于填缝料作为一种特殊的道路用材料,与生产沥青混凝土所用的基质沥青或改性沥青不同,要求有较强的变形能力以适应高低温缝宽度的变化,本试验选取的外掺剂可以明显调节填缝料的软硬,同时也起到助溶剂的作用。

1.5 制备工艺

试验表明搅拌速率越快,达到相同搅拌效果所需的时间越短,反之所需时间越长;同时合理的搅拌时间可以使改性效果达到最佳,如果搅拌时间过

短,则反应不充分,如果搅拌时间过长,则容易使材料老化、变性。为了找到最佳搅拌时间,本试验在固定转速为 4 500 rad/s,温度为 190 ℃ 条件下,将掺量为 25% 的橡胶粉加入至基质沥青中进行恒速搅拌,用数码相机记录下搅拌 30、60、90、120 min 时样品的 4 种状态,试验结果见图 1。

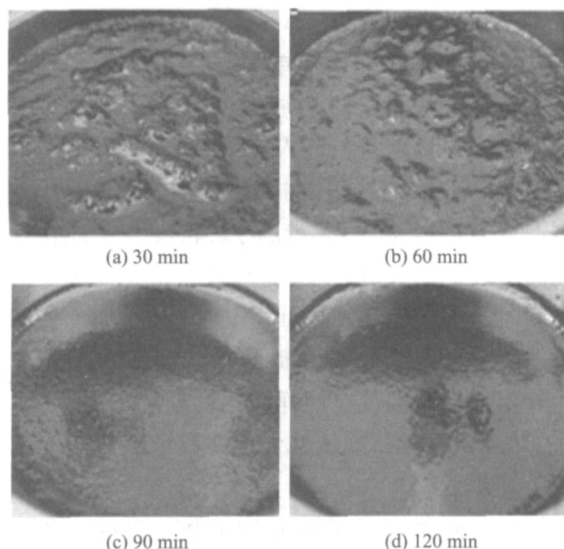


图1 表面形态与搅拌时间的关系

Fig. 1 Relation between surface morphologies and stirring time

图1说明搅拌时间越长,转速越高,相应于加工强度越大,这时橡胶颗粒在沥青中分散得越均匀,反之则易成颗粒状态。经反复试验并参考文献 [3] 最终确定工艺流程见图 2。

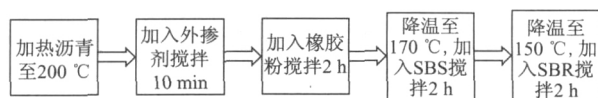


图2 制备填缝料工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of preparation process of sealant

1.6 试验方法

对不同改性剂(橡胶粉、SBS、SBR、外掺剂)的不同掺量的改性效果采取了一系列试验方法进行测试,包括沥青 3 大指标、填缝料常规指标和考虑低温性能的劲度模量、蠕变应变速率 m 值,其中,基质沥青与单纯 SBR 沥青的针入度试验采用《沥青与沥青混合料试验》中的标准针,其余复合改性沥青的针入度试验采用文献 [4] 的圆锥针,劲度模量与蠕变应变速率 m 值通过使用弯曲梁流变(BBR)在 -30 ℃ 条件下试验得到。试验中,沥青梁试样放置于两支撑点(距离为 101.6 mm)间,跨中施加 100 g 的集中荷载。试验过程 6 次采集试验点处的应

力与变形值(分别为 8、15、30、60、120 和 240 s)。弯曲蠕变模量 $S(t)$ 通过跨中荷载处外部纤维的应力与应变计算得到,其原理是基于基本的伯努利-欧拉弯曲理论 [5]。

2 结果与讨论

2.1 橡胶粉掺量的影响

为了研究橡胶粉掺量的不同对填缝料性能的影响,首先对其分散状态进行了对比,并以针入度指标对改善效果进行了分析。试验结果如下。



图3 均匀状态

Fig. 3 Uniform state

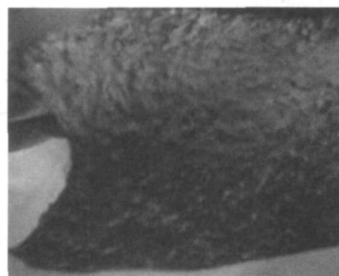


图4 颗粒状态

Fig. 4 Particle state

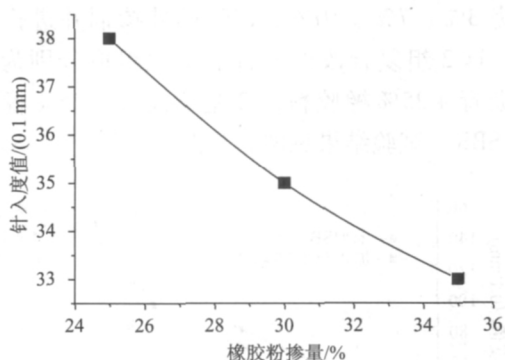


图5 针入度随橡胶粉掺量变化规律(不掺其余改性剂)

Fig. 5 Cone penetration varying with rubber powder content (without other modifiers)

图5表明当橡胶粉掺量增多的时候,成品针入度值变小,说明粘稠度变大,但试验证明当掺量达到 25% (注:本研究所掺掺量均为沥青外掺) 时,

橡胶粉在沥青中就已处于饱和状态,强力搅拌 2~3 h 之后可分散均匀(图 3),而掺量在 30% 以上时,相同搅拌时间会出现颗粒状态(图 4)。

2.2 SBR 掺量的影响

为了研究 SBR 粉末对复合改性沥青的影响,首先通过不同掺量的 SBR 粉末对 90# 基质沥青进行了改性,并测试了改性沥青的常规指标,具体测试结果详见表 4。

表 4 说明这种 SBR 改性沥青的性能基本满足规范要求,并且高低温性能得到很大改善。从表 4 中也可看出随着 SBR 掺量的增加,沥青的针入度变小,延度和软化点提高,且数据表明通过加入 4.5% 的 SBR,90# 沥青的软化点与 5℃ 延度分别提升 28% 与 932%,而针入度下降 44%。

表 4 SBR 粉末改性 90# 基质沥青测试结果

Tab. 4 Test result of SBR powder modified Asphalt No. 90

测试项目	90# 基质 沥青	添加不同 SBR 粉末的 改性沥青			交通部标准 (JTJ036—98) SBR 类		
		2.5%	4.5%	6%	II-A	II-B	II-C
针入度(25℃, 100 g, 5 s) / (0.1 mm)	82	72	46	43	≤100	≤80	≤60
软化点/℃	47	54	60	63	≥45	≥48	≥50
延度(15℃) / cm	>140	>140	>140	>140	-	-	-
延度(5℃) / cm	6.3	44	65	80	≥60	≥50	≥40

2.3 外掺剂掺量的影响

本文分别将 2 组不同配比的复合改性沥青加入掺量为 3%、7%、10%、12% 的外掺剂并进行对比分析,这 2 组复合改性沥青的配比组成分别为:① 基质沥青 + 25% 橡胶粉;② 基质沥青 + 25% 橡胶粉 + 5% SBR。试验结果见图 6 与图 7。

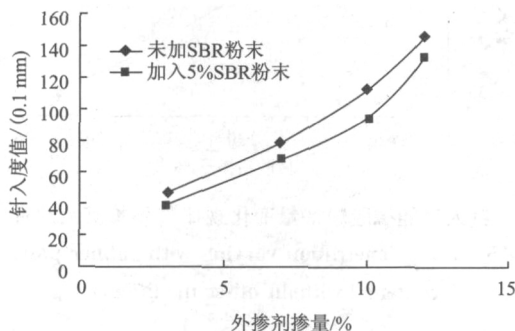


图 6 针入度与随外掺剂掺量的变化规律

Fig. 6 Cone penetration varying with additive content

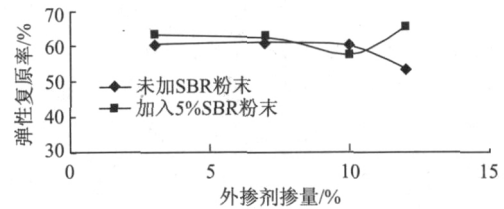


图 7 弹性复原率随外掺剂掺量变化规律

Fig. 7 Elastic recovery rate varying with additive content

试验结果表明外掺剂单独作用可以提高沥青的标号,在复合改性沥青填缝料的制备中起到调节软硬的作用,掺量越多,针入度值越大,粘稠度减小。试验中找到外掺剂的最佳掺量,使橡胶沥青填缝料在宽温度域内既能保持一定的柔软度,又能保持较好的高温性能是关键。

同时从图 6 中也可看出 SBR 粉末的加入使得针入度值明显变小,粘稠度提高;从图 7 中可以看出 SBR 粉末与外掺剂都对回弹性能影响甚小。

2.4 星点设计效应面法优化原材料最佳掺量

2.4.1 试验设计

根据前面单因素影响分析试验,可确定各因素的合理范围,以在食品生物学及工程学中广泛应用的 Design-ExpertSoftware 7.0 为辅助手段设计响应面试验。选用了中心复合模型 (CCD),做 4 因素 5 水平共 30 个试验点 (6 个中心点) 的响应面分析试验。这 30 个试验点可分为 2 类: 其一是析因点,自变量取值在各因素所构成的三维顶点,共有 24 个析因点;其二是零点,为区域的中心点,零点试验重复 6 次,用以估计试验误差^[6-18]。以针入度、弹性复原率、蠕变劲度、蠕变应变速率 m 值、价格为指标进行分析,将每个指标均标准化为 0~1 之间的归一值,计算各指标归一值的几何平均值,得总评归一值 OD ^[9]。公式如下:

$$OD = (d_1 d_2 \cdots d_n)^{1/k}, \quad (1)$$

式中 k 为指标数。

对取值越小越好指标的归一值 $d_{\min}$ 和取值越大越好指标的归一值 $d_{\max}$ 采用 Hassan 方法进行数学转换求得,公式如下:

$$d_{\min} = (\gamma_{\max} - \gamma_i) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}), \quad (2)$$

$$d_{\max} = (\gamma_i - \gamma_{\min}) / (\gamma_{\max} - \gamma_{\min}), \quad (3)$$

式中, γ 为指标的数值; i 为试验号; $\gamma_{\max}$ 为指标中的最大值; $\gamma_{\min}$ 为指标中的最小值。

表 5 为响应面试验因素水平表,表 6 为响应面试验数据表。

表 5 响应面试验因素水平

Tab. 5 Levels of response surface experimental factors

因素	-2	-1	0	1	2
X_1 / %	15.00	18	21	24	27
X_2 / %	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00
X_3 / %	0.00	2.50	5.00	7.50	10.00
X_4 / %	2.00	4.00	6.00	8.00	10.00

注: X_1 为表橡胶粉掺量; X_2 为外掺剂掺量; X_3 为 SBS 掺量, X_4 为 SBR 掺量

2. 4. 2 试验结果分析

基于最小二乘法原理, 采用 SPSS 软件, 以 4 种成分掺量为因素、总评归一值为指标进行 4 元 2 次多项式拟合并逐次去掉最不显著项直到方程及各项均显著为止, 最终结果如表 7 ~ 表 9 所示。

表 6 响应面试验数据

Tab. 6 Experimental data of response surface

Set	Type	X_1	X_2	X_3	X_4	针入度/ (0.1mm)	弹性复 原率/%	蠕变劲 度/MPa	m 值	OD
4	Fact	1	1	-1	-1	92.5	55.9	249.7	0.25	0.29
17	Axial	-2	0	0	0	59.3	59.3	277.2	0.274	0.40
1	Fact	-1	-1	-1	-1	59.0	52.3	142.5	0.355	0.52
5	Fact	-1	-1	1	-1	45.3	61.3	113.8	0.305	0.65
21	Axial	0	0	-2	0	87.3	59.8	355.6	0.241	0
18	Axial	2	0	0	0	67.3	67.7	111.8	0.325	0.70
16	Fact	1	1	1	1	64.5	63.7	90.7	0.38	0.76
28	Center	0	0	0	0	61.3	57.3	123	0.292	0.54
9	Fact	-1	-1	-1	1	65.0	54.3	246	0.24	0.29
15	Fact	-1	1	1	1	81.0	63.3	125.3	0.309	0.58
20	Axial	0	2	0	0	73.0	58.3	213.6	0.269	0.42
2	Fact	1	-1	-1	-1	79.3	63.0	82	0.33	0.64
25	Center	0	0	0	0	68.3	68.3	90.9	0.269	0.59
13	Fact	-1	-1	1	1	53.0	65.7	122.3	0.28	0.62
19	Axial	0	-2	0	0	47	60.3	248	0.219	0
3	Fact	-1	1	-1	-1	123.3	47.3	144.1	0.332	0
30	Center	0	0	0	0	69.2	65.8	96.3	0.313	0.67
14	Fact	1	-1	1	1	53.7	66.8	97.9	0.321	0.73
6	Fact	1	-1	1	-1	53.3	66.3	158.6	0.31	0.66
10	Fact	1	-1	-1	1	71.7	59.8	174	0.27	0.47
26	Center	0	0	0	0	69.2	65.8	92.3	0.287	0.62
11	Fact	-1	1	-1	1	85.7	67.3	125	0.299	0.58
24	Axial	0	0	0	2	59.2	65.0	144	0.29	0.61
27	Center	0	0	0	0	68.3	72.7	82	0.308	0.72
22	Axial	0	0	2	0	70.5	75.7	47.3	0.362	0.85
23	Axial	0	0	0	-2	89.3	79.5	145	0.292	0.61
29	Center	0	0	0	0	78.7	65.0	110	0.33	0.64
7	Fact	-1	1	1	-1	59.3	78.7	120.3	0.302	0.75
8	Fact	1	1	1	-1	79.0	77.3	87.7	0.351	0.78
12	Fact	1	1	-1	1	88.0	75.0	85.2	0.333	0.70

表 7 OD 回归模型汇总

Tab. 7 Summary of OD regression model

模型	R	R_2	调整 R_2	标准估计误差
1	0.830	0.689	0.608	0.142 21

表 8 OD 回归方差分析

Tab. 8 Analysis of OD regression variance

模型	平方和	自由度	均方	F	$Prob > F$
回归	1.030	6	0.172	8.492	6×10^{-5}
残差	0.465	23	0.020	—	—
总计	1.495	29	—	—	—

表 9 OD 回归方程系数

Tab. 9 Coefficients of OD regression equation

模型	非标准化系数		标准系数	t	$Prob > t$
	B	标准误差			
常量	-1.018	0.316	—	-3.217	0.003 8
X_1	0.023	0.010	0.274	2.354	0.027 5
X_2	0.128	0.058	1.540	2.219	0.036 6
X_3	0.137	0.038	1.368	3.621	0.001 4
X_2X_2	-0.009	0.003	-2.046	-3.161	0.004 4
X_2X_4	0.008	0.003	0.850	2.363	0.027 0
X_3X_4	-0.012	0.006	-0.916	-2.069	0.050 0

各因子的主次顺序为 X_3 , 常量, X_2X_2 , X_2X_4 , X_1 , X_2 , X_3X_4 。

确定此时的回归方程为:

$$OD = -1.018 + 0.023X_1 + 0.128X_2 + 0.137X_3 - 0.009X_2X_2 + 0.008X_2X_4 - 0.012X_3X_4。$$

拟定 SBS 掺量为 5%, SBR 掺量为 3% 时, 总评归一值随橡胶粉掺量及外掺剂掺量变化规律见图 8。

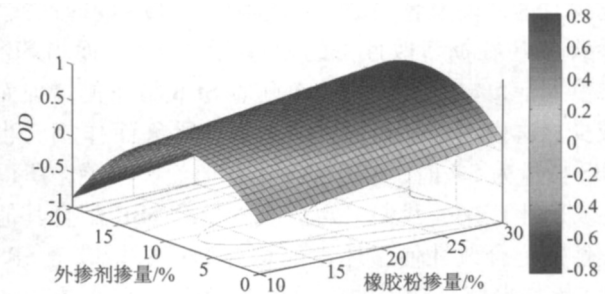


图 8 OD 随橡胶粉、外掺剂掺量变化效应面

Fig. 8 Response surface of OD varying with contents of rubber powder and additive

可以看出, 橡胶粉掺量越多, OD 值越大, 方案越好, 但试验中发现橡胶粉掺量过多, 将会在加工时出现结团现象, 不易混合均匀, 所以在实际生产中建议采用易加工的最大掺量 25%; 外掺剂对 OD 的影响呈抛物线趋势, 即在一定掺量范围内随着外

掺剂的增加, OD 值增大, 超出该范围则随外掺剂掺量增加, OD 值减小, 外掺剂的最佳掺量在 7% ~ 8% 之间。

拟定橡胶粉掺量为 25%, 外掺剂掺量为 7%, 总评归一值随 SBS 与 SBR 掺量变化规律见图 9。

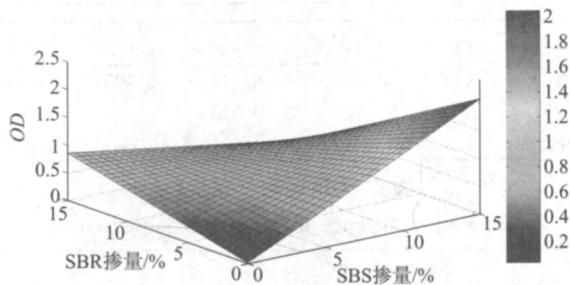


图9 OD 随 SBS、SBR 掺量变化效应面

Fig. 9 Response surface of OD varying with contents of SBS and SBR

图9表明, SBS 在掺量较少时, 它的增加会促进 OD 值增加, 但 SBS 掺量超过 5% 时, 继续增加会引起 OD 值下降, 原因是 SBS 在掺量较少时可以大幅改善沥青性能, 而超过 5% 以后, 提高幅度变慢甚至会影响其他改性剂改性效果而引起总评归一值 OD 下降, SBS 最佳掺量为 5%; SBR 对 OD 值影响较小, 即通过 SBR 改善的性能与 SBR 降低其他改性剂的作用二者效应近似抵消, 所以在实际生产中, 我们只需加入少量的 SBR 配合其他改性剂起到复合改性作用即可, 本试验定为 3%。

从图9中可以看出, 当 SBS 掺量小于 5% 时, OD 值会随着 SBR 掺量的增加而变大, 且 SBS 掺量越少, 这种现象越显著。这是由于 SBS 掺量减少会导致 SBR 在沥青改性中的相对比例变大, 而当 SBS 掺量大于 5% 时, OD 值将会随着 SBR 掺量的增加而减少, 这表明改性剂过多也将起到负面作用。当 SBS 掺量为 5% 时, SBR 对于 OD 值没有影响, 所以在实际生产中, 我们只需加入少量的 SBR 配合其他改性剂复合改性使整体性能均衡即可。相应于 SBS 的 5% 临界值, SBR 的临界值为 10%。在小掺量的情况下, OD 值对于 SBS 比 SBR 更为敏感。本试验选取 SBS 掺量为 5%, SBR 掺量为 3%。

综上所述, 4 种改性剂的掺量, 橡胶粉为 25%, 外掺剂为 7%, SBS 为 5%, SBR 为 3% 时, 总评归一值 OD 最大。

2.4.3 模型验证

对上述确定的配方进行试验并与数学模型得到预测值进行比较, 结果见表 10。

表 10 验证试验表

Tab. 10 Data of validation test

试验项目	流动度 /mm	针入度 / (0.1 mm)	弹性复原率 /%	低温拉伸 /mm	劲度模量 /MPa	m 值	OD
预测值	—	73.1	70.6	—	85.3	0.347	0.746
实际值	0	67.3	67.7	>15	111.7	0.370	0.752
偏差	—	8.6	4.3	—	-23.6	-6.2	-0.8

从表 10 可以看出, 虽然有个别指标偏差较大, 但整体来看预测模型较准确, 可用于实践中。

3 结语

(1) 制得一种高弹性、低温性能优异的复合改性沥青填缝料, 其配方如下: 橡胶粉为 25%, SBS 为 5%, SBR 为 3%, 添加剂为 7%;

(2) 星点设计效应面法和总评归一值用于复合改性沥青填缝料的优化可行、有效。

(3) 橡胶粉掺量越多, 改性沥青粘稠度越高, 弹性越大。

(4) SBR 能改善沥青中高温抗剪切变形能力与低温抗开裂能力。

(5) 外掺剂能够调节复合改性沥青的柔软度, 也能起到助溶剂的作用。

参考文献:

References:

- [1] 吴蓁, 郭青. 单组分聚氨酯弹性填缝剂的合成工艺研究 [J]. 化学建材, 2001 (3): 27-29.
WU Zhen, GUO Qing. Study on Synthesis Process of Single Components Elastic Polyurethane Sealant [J]. Chemical Materials for Construction, 2001 (3): 27-29.
- [2] 张东长, 龙丽琴, 刘茂光. 新型长寿命填缝料的开发研究 [J]. 公路交通技术, 2009 (6): 52-53.
ZHANG Dongchang, LONG Liqin, LIU Maoguang. Development and Research of New-type Long-life Joint Fillers [J]. Technology of Highway and Transport, 2009 (6): 52-53.
- [3] 寿崇琦, 尚盼, 姜嵩. 水泥混凝土路面复合型填缝材料的研究 [J]. 中外公路, 2009, 29 (6): 224-227.
SHOU Chongqi, SHANG Pan, LOU Song. Research on Composite Filling Materials for Cement Concrete Pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29 (6): 224-227.
- [4] ODUM-EWUAKYE B, ATTOH-OKINE N. Sealing System Selection for Jointed Concrete Pavements: A Review [J]. Construction and Building Materials, 2006, 20

- (8): 591 – 602.
- [5] SANDBERG L B. Comparisons of Silicone and Urethane Sealant Durabilities [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1991, 3 (4): 278 – 291.
- [6] AL-HADIDY A I, TAN Yiqiu. Effect of Polyethylene on Life of Flexible Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (3): 1456 – 1464.
- [7] AL-HADIDY A I, TAN Yiqiu. Mechanistic Approach for Polypropylene-modified Flexible Pavements [J]. Materials and Design, 2009, 30 (4): 1133 – 1140.
- [8] AL-HADIDY A I, TAN Yiqiu. Mechanistic Analysis of ST and SBS-modified Flexible Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (8): 2941 – 2950.
- [9] AL-HADIDY A I, TAN Yiqiu, HAMEED A T. Starch as a Modifier for Asphalt Paving Materials [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25: 14 – 20.
- [10] 李宇峙, 徐敏, 黄云涌, 等. 钢桥面复合改性沥青混合料铺装路用性能研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (3): 81 – 85.
- LI Yuzhi, XU Min, HUANG Yunyong, et al. Research on Performance of Compound Modified Asphalt Mixture in Steel Deck Pavement [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (3): 81 – 85.
- [11] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 基于均匀设计的砾类硫酸盐渍土盐胀特性试验研究 [J]. 公路交通科技, 2009, 26 (5): 29 – 33.
- ZHANG Shasha, YANG Xiaohua, DAI Zhiren. Experimental Study on Salt Expansion of Gravel Sulfate Salty Soil Based on Uniform Design [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26 (5): 29 – 33.
- [12] 邵洁, 关宏志, 王鑫. 正交试验设计在交通意向调查中的应用 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (10): 106 – 109.
- ZHENG Jie, GUAN Hongzhi, WANG Xin. Application of Orthogonal Design on Stated Preference Survey [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (10): 106 – 109.
- [13] 崔文峰. SBR 反映共混改性沥青制备及结果与热存储稳定性能研究 [J]. 兰州: 西北师范大学, 2008.
- CUI Wenfeng. Study on Properties and High-temperature Storage Stability of SBR-chemical Modified Asphalts [J]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2008.
- [14] JT/T 589—2004, 水泥混凝土路面嵌缝密封材料 [S]. JT/T 589—2004, Joint Sealing Material of Cement Concrete Pavement.
- [15] BAHIA H U, ANDERSON D A, CHRISTENSEN D W. The Bending Beam Rheometer: A Simple Device for Measuring Low – temperature Rheology of Asphalt Binders [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1992, 61: 117 – 153.
- [16] MCLEOD A D, LAM F C, GUPTA P K, et al. Optimized Synthesis of Polyglutaraldehyde Nanoparticles Using Central Composite Design [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1988, 77 (8): 704 – 710.
- [17] 吴伟, 崔光华. 星点设计 – 效应面优化法及其在药学中的应用 [J]. 国外医学药学分册, 2000, 27 (5): 292 – 297.
- WU Wei, CUI Guanghua. Application of Central Composite Design-response Surface Methodology in Pharmacy. Foreign Sciences Section on Pharmacy, 2000, 27 (5): 292 – 297.
- [18] ABU-IZZA K A, GARCIA-CONTRERAS L, LU D R. Preparation and Evaluation of Sustained Release AZT-loaded Microspheres: Optimization of the Release Characteristics Using Response Surface Methodology [J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 1996, 85 (2): 144 – 149.
- [19] 辛星, 谭忆秋, 徐立廷, 等. 橡胶颗粒沥青混合料设计的影响因素分析 [J]. 公路, 2006 (11): 161 – 164.
- XIN Xing, TAN Yiqiu, XU Liting, et al. Analysis on Influencing Factor of Rubber Asphalt Mixture Design [J]. Highway, 2006 (11): 161 – 164.