

文章编号: 1674-599X(2021)04-0014-06

基于正交试验的胶粉改性沥青配方优化

宋宽彬¹, 王笑风^{2,3,4}, 褚付克^{2,3,4}, 殷卫永^{2,3,4}

(1.河南交通投资集团有限公司, 河南 郑州 450016; 2.交通运输行业公路建设与养护技术、材料及装备研发中心, 河南 郑州 450000; 3.河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000; 4.河南省固废材料道路工程循环利用重点实验室, 河南 郑州 450000)

摘 要: 为研究不同配方因素对胶粉改性沥青性能影响程度并优化制备配方, 选择A(胶粉来源)、B(胶粉细度)、C(胶粉掺量)3个因素, 每个因素选择3个水平, 以胶粉改性沥青软化点、延度和黏度为评价指标, 通过正交试验优化胶粉改性沥青配方。研究表明: 三因素对软化点、延度和黏度均有显著性影响, 对软化点影响程度为 $C>A>B$, 最佳水平组合为 $A_1B_2C_3$; 对延度影响程度为 $B>C>A$, 最佳水平组合为 $A_1B_3C_2$; 对黏度影响程度为 $C>B>A$, 最佳水平组合为 $A_1B_2C_2$ 。综合各因素对性能影响, 确定不同因素的优选组合方案为 $A_1B_2C_2$ 。该组合下: 胶粉改性沥青软化点为 71°C 、延度为 11.1 cm 、黏度为 $3.0\text{ Pa}\cdot\text{s}$, 胶粉改性沥青综合性能良好。

关键词: 道路工程; 胶粉改性沥青; 正交试验; 配方优化

中图分类号: U414

文献标志码: A

Formulation optimization of crumb rubber modified asphalt based on orthogonal test

SONG Kuan-bin¹, WANG Xiao-feng^{2,3,4}, CHU Fu-ke^{2,3,4}, YIN Wei-yong^{2,3,4}

(1.Henan Transport Investment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China;

2.Research and Development Center of Transport Industry of Technologies, Materials and Equipments of Highway Construction and Maintenance, Zhengzhou 450000, China;

3.Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;

4.Henan Key Laboratory of Recycling Solid Waste Materials for Road Engineering, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: In order to study the influence of formulation factors on the performance of crumb rubber modified asphalt, resulting in optimizing the preparation formula, the factors of A (rubber powder source), B (rubber powder fineness) and C (rubber powder content) were selected to set the three levels. The softening point, ductility and viscosity of crumb rubber modified asphalt were used as evaluation indexes to optimize the formulation of crumb rubber modified asphalt by orthogonal test. The results show that, those factors have significant influence on softening point, ductility and viscosity. The impact on softening point can be described as: $C>A>B$, and the best level combination is $A_1B_2C_3$. The impact on ductility can be described as: $B>C>A$, and the best level combination is $A_1B_3C_2$. The impact on viscosity can be described as: $C>B>A$, and the best level combination is $A_1B_2C_2$. The preferred combination scheme of different factors is determined as $A_1B_2C_2$. Using this combination, the softening point of crumb rubber modified asphalt is 71°C , the ductility is 11.1 cm , and the viscosity is $3.0\text{ Pa}\cdot\text{s}$. The comprehensive performance of rubber modified asphalt is satisfactory.

Key words: road engineering; crumb rubber modified asphalt; orthogonal test; formulation optimization

收稿日期: 2020-12-15

基金项目: 中原千人计划—中原科技创新领军人才项目资助(204200510004)

作者简介: 宋宽彬(1990—), 男, 河南交通投资集团有限公司工程师。

胶粉改性沥青常用于道路工程建设,可消耗大量废旧轮胎胶粉,是废旧轮胎资源化、无害化处理的重要途径^[1]。胶粉改性沥青混合料还具有较好的综合路用性能^[2-3]。胶粉改性沥青制备过程中,原材料配方是影响性能的重要因素。不少学者针对胶粉改性沥青制备中原材料配方优化开展了相关研究。王笑风等人^[4]研究了不同类型橡胶粉与SBS复合改性沥青的三大指标及测力延度,发现硫化胶粉复合改性沥青的储存稳定性及抗变形能力优于脱硫胶粉复合改性沥青的。马万等人^[5]通过DSR温度扫描,研究了不同胶粉掺量橡胶沥青的复数模量和相位角,结果表明:在较高温度的掺量测试范围内,胶粉掺量越高,胶粉改性沥青复数剪切模量越大,胶粉的增黏作用越强。王辉等人^[6]研究了不同胶粉掺量和细度的胶粉改性沥青常规指标、抗离析性能和车辙因子,发现胶粉掺量宜小于22%,胶粉细度宜小于80目。这些关于胶粉改性沥青配方优化的研究,主要分析了单因素变量对性能的影响,未能综合分析不同影响因素之间的交互作用。

正交试验通过均衡布设影响因素及水平,分析不同影响因素之间的交互作用,快速确定最佳方案,是工程中常用的试验分析方法^[7]。目前相关学者通过正交试验确定胶粉改性沥青最佳配方及工艺^[8],但这些正交试验研究大多采用极差分析^[9-10],未能区分试验过程中因素水平的改变及试验误差所引起的数据波动,且无法定量分析因素影响的重要程度。而正交试验的方差分析,可有效

效弥补极差分析的不足^[11]。因此,本研究针对胶粉改性沥青配方优化环节,基于三因素三水平正交试验,以胶粉改性沥青软化点、延度和黏度作为性能评价指标,通过极差分析和方差分析,综合分析每个因素对不同性能指标的影响程度,考虑胶粉改性沥青总体性能并确定最佳配方,以期胶粉改性沥青制备及配方优化提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

1.1.1 基质沥青

采用中海油AH-70作为基质沥青制备胶粉改性沥青。AH-70沥青各项指标见表1。

表1 AH-70基质沥青检测结果

项目	针入度/ 0.1 mm	延度/cm	软化点/℃	闪点 (开口)/℃
测试结果	67	>150	49.3	290
技术要求	60~80	≥100	≥46	≥230

1.1.2 橡胶粉

采用3种不同来源和细度的胶粉作为原材料。胶粉来源分别为大货车胶粉、客车胶粉、小汽车胶粉。胶粉细度分别为20、40、60目。胶粉技术指标见表2。不同来源的胶粉性能指标均满足《路用废胎硫化橡胶粉》(JT/T 797-2011)要求。

表2 胶粉性能指标

胶粉种类	相对密度	筛余物/%	含水率/%	金属含量/%	纤维含量/%	灰分/%	丙酮抽出物/%	炭黑含量/%	橡胶烃含量/%
大货车胶粉	1.122	3.5	0.3	0.02	0.37	3.7	10.1	35.1	52.6
客车胶粉	1.117	3.9	0.2	0.02	0.32	4.2	11.6	33.5	51.6
小汽车胶粉	1.112	4.1	0.3	0.01	0.34	3.5	13.4	31.4	49.2
规范要求	1.10~1.30	<10	<1	<0.03	<1	≤8	≤16	≥28	≥48

1.1.3 胶粉改性沥青

自制胶粉改性沥青,胶粉掺量以基质沥青为基准,外掺20%,同时,掺加0.7%表面活性剂和0.2%交联剂。胶粉改性沥青制备工艺为:在180±5℃条件下,先以2 000 r/min转速搅拌45 min,再以3 500 r/min剪切搅拌45 min。胶粉改性沥青制备完成后,立即进行后续相关性能检测试验。

效弥补极差分析的不足^[11]。因此,本研究针对胶粉改性沥青配方优化环节,基于三因素三水平正交试验,以胶粉改性沥青软化点、延度和黏度作为性能评价指标,通过极差分析和方差分析,综合分析每个因素对不同性能指标的影响程度,考虑胶粉改性沥青总体性能并确定最佳配方,以期胶粉改性沥青制备及配方优化提供参考。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

1.1.1 基质沥青

采用中海油AH-70作为基质沥青制备胶粉改性沥青。AH-70沥青各项指标见表1。

表1 AH-70基质沥青检测结果

项目	针入度/ 0.1 mm	延度/cm	软化点/℃	闪点 (开口)/℃
测试结果	67	>150	49.3	290
技术要求	60~80	≥100	≥46	≥230

1.1.2 橡胶粉

采用3种不同来源和细度的胶粉作为原材料。胶粉来源分别为大货车胶粉、客车胶粉、小汽车胶粉。胶粉细度分别为20、40、60目。胶粉技术指标见表2。不同来源的胶粉性能指标均满足《路用废胎硫化橡胶粉》(JT/T 797-2011)要求。

1.2 试验方法

以胶粉来源(A)、细度(B)和掺量(C)作为影响因素,每个因素选择3个水平进行正交试验。试验因素及水平见表3。设置空白对照列,对试验结果进行方差分析。正交试验不同试验组试验因素及水平见表4。每组正交试验中,除胶粉改性沥青制备温度和剪切搅拌时间等因素外,其他

影响因素均保持一致。

表3 正交试验因素及水平

Table 3 Factors and levels of the orthogonal test

水平	A	B/目	C/%
水平 1	载重货车胶粉	20	15
水平 2	大客车胶粉	40	20
水平 3	小客车胶粉	60	25

表4 正交试验不同试验组因素及水平

Table 4 Factors and levels of different experimental groups in the orthogonal test

序号	A	B/目	C/%	空白对照列
1	(1) 载重货车	(1) 20	(1) 15	(1)
2	(1) 载重货车	(2) 40	(2) 20	(2)
3	(1) 载重货车	(3) 60	(3) 25	(3)
4	(2) 大客车	(1) 20	(2) 20	(3)
5	(2) 大客车	(2) 40	(3) 25	(1)
6	(2) 大客车	(3) 60	(1) 15	(2)
7	(3) 小客车	(1) 20	(3) 25	(2)
8	(3) 小客车	(2) 40	(1) 15	(3)
9	(3) 小客车	(3) 60	(2) 20	(1)

注：括号内数字代表水平序号，括号外数字代表水平值

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

胶粉改性沥青使用过程中，需重点关注高、低温性能和黏度。为确保高温性能，胶粉改性沥青应具有相对较高的黏度，但黏度又不能过高，防止输送过程中堵塞管道，影响施工性能。高温性能评价指标选择软化点，低温性能评价指标选择5℃延度。因此，本试验采用软化点、5℃延度和177℃黏度评价胶粉改性沥青性能优劣。不同影响因素及水平组合下，胶粉改性沥青性能试验结果见表5。

2.2 结果分析

采用极差分析法和方差分析法，确定不同评价指标下的最佳组合，分析不同因素对胶粉改性沥青性能的影响。采用极差分析法分析每个因素在不同水平下的试验指标和均值，以及每个因素在不同水平下的试验指标极大值和极小值的极差，初步确定每个因素的最优水平和不同水平对试验结果的影响程度。极差越大，该因素不同水平对试验结果的影响程度越大。方差分析根据统计学

原理，进一步分析不同因素对试验结果是否显著性影响。方差越大，该因素不同水平对试验结果的影响程度越大。

2.2.1 软化点结果分析

软化点试验结果极差和方差分析结果见表6。由表6中极差分析结果可知，胶粉种类因素在第一水平（载重货车）对应的软化点均值为68.6℃，为3个水平中最高值。胶粉细度因素在3个水平中，软化点最高值为第二水平（40目）对应的均值为68.5℃。胶粉掺量因素在3个水平中软化点最高值为第三水平（25%）对应的软化点均值70.5℃。按照不同因素在不同水平下软化点极差从大到小，不同因素的排序为胶粉掺量（均值极差8.7℃）>胶粉种类（均值极差4.8℃）>胶粉细度（均值极差3.7℃），表明：3个因素对胶粉改性沥青软化点影响程度大小为胶粉掺量>胶粉种类>胶粉细度。

由表6中方差分析结果还可知，3个因素的F统计量值从大到小排序为：胶粉掺量（1 072.8%）>胶粉种类（319.9）>胶粉细度（237.6目），表明：3个因素对胶粉改性沥青软化点影响程度大小为胶粉掺量>胶粉种类>胶粉细度。3个因素的F统计量值均大于F统计临界值，表明：3个因素对胶粉改性沥青软化点均有显著性影响。

根据软化点极差和方差分析可知，三因素对软化点均有显著性影响，影响程度排序为：因素C（胶粉掺量）>因素A（胶粉种类）>因素B（胶粉细度）。不同因素和水平下的软化点最优组合方案为A₁B₂C₃。

表5 不同因素和水平组合下胶粉改性沥青性能正交试验结果

Table 5 Orthogonal test results of crumb rubber modified asphalt with different factors and levels

试验序号	软化点/℃	延度/cm	黏度/(Pa·s)
1	62.7	8.9	1.5
2	71.0	11.1	3.0
3	72.0	10.4	4.1
4	64.9	8.7	1.9
5	72.6	8.2	4.4
6	60.6	9.9	1.2
7	66.8	7.1	3.0
8	61.9	8.4	1.5
9	62.7	10.9	1.7

表6 软化点正交试验结果极差和方差分析
Table 6 Range and variance analysis of softening point of orthogonal test results

分析指标		A	B /目	C /%	空白列
极差分析	X_{ji}	205.70	194.40	185.20	198.00
	X_{j2}	198.10	205.50	198.60	198.40
	X_{j3}	191.40	195.30	211.40	198.80
	K_j	14.30	11.10	26.20	0.80
	\bar{X}_{ji}	68.60	64.80	61.70	66.00
	\bar{X}_{j2}	66.00	68.50	66.20	66.10
	\bar{X}_{j3}	63.80	65.10	70.50	66.30
	\bar{K}_j	4.80	3.70	8.70	0.30
方差分析	S_j	34.13	25.34	114.43	0.11
	M_j	17.06	12.67	57.21	0.05
	F_j	319.90	237.60	1 072.80	—
临界值		$F_{0.05}(2, 2) = 19.0$			

注: 表中各符号含义为: X_{ji} : 第*j*因素在第*i*水平时所对应的试验指标和; \bar{X}_{ji} : 第*j*因素在第*i*水平时所对应的试验指标的均值; K_j : 第*j*因素的试验指标和的极差; \bar{K}_j : 第*j*因素的试验指标的均值的极差; S_j : 第*j*因素偏差平方和; M_j : 第*j*因素方差; F_j : 第*j*因素*F*统计量值。若因素的方差小于2倍的误差方差, 则将该因素偏差平方和、自由度并入误差的偏差平方和、自由度

2.2.2 延度结果分析

延度试验结果极差和方差分析结果见表7。由表7中极差分析结果可知, 胶粉种类因素在第一水平(载重货车)对应的延度均值为10.1 cm, 为3个水平中最高值。胶粉细度因素在3个水平中延度最高值为第三水平(60目)对应的延度均值为10.4 cm。胶粉掺量因素在3个水平中延度最高值为第二水平(20%)对应的延度均值为10.2 cm。按照不同因素在不同水平下延度极差从大到小, 不同因素的排序为: 胶粉细度(2.2 cm) > 胶粉掺量(1.7 cm) > 胶粉种类(1.3 cm), 表明: 3个因素对胶粉改性沥青延度影响程度大小为胶粉细度 > 胶粉掺量 > 胶粉种类。

由表7中方差分析结果还可知, 3个因素的*F*统计量值从大到小排序为: 胶粉细度(102.4目) > 胶粉掺量(63.7%) > 胶粉种类(47.00), 表明: 3个因素对胶粉改性沥青延度影响程度大小为胶粉细度 > 胶粉掺量 > 胶粉种类。3个因素的*F*统计量均大于*F*统计临界值, 表明: 3个因素对胶粉改性沥青延度均有显著性影响。

根据延度极差和方差分析可知, 3个因素对延

度均有显著性影响, 影响程度排序为: 因素B(胶粉细度) > 因素C(胶粉掺量) > 因素A(胶粉种类)。不同因素和水平下的延度最优组合方案为 $A_1B_3C_2$ 。

表7 延度正交试验结果极差和方差分析
Table 7 Range and variance analysis of ductility of orthogonal test results

分析指标		A	B /目	C /%	空白列
极差分析	X_{ji}	30.40	24.70	27.20	28.00
	X_{j2}	26.80	27.70	30.70	28.10
	X_{j3}	26.40	31.20	25.70	27.50
	K_j	4.00	6.50	5.00	0.60
	X_{ji}	10.10	8.20	9.10	9.30
	\bar{X}_{j2}	8.90	9.20	10.20	9.40
	\bar{X}_{j3}	8.80	10.40	8.60	9.20
	\bar{K}_j	1.30	2.20	1.70	0.20
方差分析	S_j	3.24	7.06	4.39	0.07
	M_j	1.62	3.53	2.19	0.03
	F_j	47.00	102.40	63.70	—
临界值		$F_{0.05}(2, 2) = 19.0$			

2.2.3 黏度结果分析

黏度试验结果极差和方差分析结果见表8。由表8中极差分析结果可知, 胶粉种类因素在第一水平(载重货车)对应的黏度均值为2.9 Pa·s, 是3个水平中最高值。胶粉细度因素在3个水平中, 为黏度最高值为第二水平(40目), 对应的黏度均值3.0 Pa·s。胶粉掺量因素在3个水平中, 黏度最高值为第三水平(25%), 对应的黏度均值3.8 Pa·s, 但是该黏度值过高, 对施工不利。在目前普通施工设备下, 改性沥青过于黏稠, 容易堵管或导致流动速度和泵送速度降低, 严重降低生产产量和进度。因此, 胶粉掺量因素在3个水平中, 黏度最优值选为第二水平(20%)。按照不同因素在不同水平下的黏度极差排序为胶粉掺量(2.4 Pa·s) > 胶粉细度(0.8 Pa·s) = 胶粉种类(0.8 Pa·s), 表明: 3个因素对胶粉改性沥青黏度影响程度大小为胶粉掺量 > 胶粉细度 = 胶粉种类。

由表8中方差分析结果还可知, 3个因素的*F*统计量值排序为胶粉掺量(319.5) > 胶粉细度(39.3) > 胶粉种类(33.3), 表明: 3个因素对胶粉改性沥青黏度影响程度大小为胶粉掺量 > 胶粉细度 > 胶粉种类。3个因素的*F*统计量均大于*F*统计临界值, 表明: 3个因素对胶粉改性沥青黏度均

有显著性影响。

根据黏度极差和方差分析可知，三因素对黏度均有显著性影响，影响程度排序为因素 C（胶粉掺量）> 因素 B（胶粉细度）> 因素 A（胶粉种类）。不同因素和水平下的黏度最优组合方案为 A₁B₂C₂。

表 8 黏度正交试验结果极差和方差分析

Table 8 Range and variance analysis of viscosity of orthogonal test results

分析指标		A	B /目	C /%	空白列
极差分析	X_{j1}	8.60	6.40	4.20	7.60
	X_{j2}	7.50	8.90	6.60	7.20
	X_{j3}	6.20	7.00	11.50	7.50
	K_j	2.40	2.50	7.30	0.40
	\bar{X}_{j1}	2.90	2.10	1.40	2.50
	\bar{X}_{j2}	2.50	3.00	2.20	2.40
	\bar{X}_{j3}	2.10	2.30	3.80	2.50
	K_j	0.80	0.80	2.40	0.10
方差分析	S_j	0.96	1.14	9.23	0.03
	M_j	0.48	0.57	4.61	0.01
	F_j	33.30	39.30	319.50	-
临界值		$F_{0.05}(2, 2) = 19.0$			

2.2.4 综合分析

根据胶粉改性沥青的软化点、延度和黏度的分析，将各因素对不同性能影响程度及不同性能的最佳组合方案进行对比，见表 9。

根据性能指标重要程度和不同因素对性能的影响程度，结合不同性能指标下的最优组合，依次确定不同因素的最优水平。胶粉改性沥青使用过程中，主要利用高黏及良好的高温性能，提高路面性能。高黏和高温性能具有一定内在关系，高黏促使高温性能提升。因素 C（胶粉掺量）对软化点和黏度影响程度最显著，软化点在该因素下的最佳水平为水平三，但黏度在该因素下的最佳水平为水平二，若选取水平三会导致黏度过高，严重影响施工性能。因此，因素 C 的最佳水平确定为水平二，即定为 C₂，该水平也是延度指标在该因素下的最佳水平。

在黏度指标中，因素 A 和 B 的影响程度基本一致。软化点指标中，因素 A 的影响程度大于因素 B 的，选择因素 A 为第二影响因素，不同性能指标下，因素 A 的最优水平均为水平一。因此，因素 A 的最佳水平确定为水平一，即定为 A₁。针对第三

影响因素 B，软化点和黏度指标中，该因素的最佳水平均为水平二；延度指标中，因素 B 的水平三为最佳水平。综合考虑因素 B 不同水平对性能的影响，确定其最佳水平为水平二，即定为 B₂。因此，确定不同因素的最佳组合方案为 A₁B₂C₂。该组合下，胶粉改性沥青综合性能良好。

表 9 各因素对不同性能影响程度及最佳组合方案

Table 9 Influence degree of various factors on different performance and the best combination scheme

评价指标	因素影响程度	最佳方案组合	综合最佳方案	最佳方案性能
软化点	C>A>B	A ₁ B ₂ C ₃	A ₁ B ₂ C ₂	71.0℃
延度	B>C>A	A ₁ B ₃ C ₂		11.1 cm
黏度	C>B>A	A ₁ B ₂ C ₂		3.0 Pa·s

3 结论

通过对不同因素和水平下的正交试验结果分析，得出结论为：

- 1) 三因素对软化点均有显著性影响，影响程度排序为因素 C（胶粉掺量）> 因素 A（胶粉种类）> 因素 B（胶粉细度）。针对软化点的最优组合方案为 A₁B₂C₃。
- 2) 三因素对延度均有显著性影响，影响程度排序为因素 B（胶粉细度）> 因素 C（胶粉掺量）> 因素 A（胶粉种类）。针对延度的最优组合方案为 A₁B₃C₂。
- 3) 三因素对黏度均有显著性影响，影响程度排序为因素 C（胶粉掺量）> 因素 B（胶粉细度）> 因素 A（胶粉种类）。针对黏度的最优组合方案为 A₁B₂C₂。
- 4) 根据各因素对性能影响，确定最佳不同因素的最佳组合方案为 A₁B₂C₂。该组合下，胶粉改性沥青软化点为 71℃，延度为 11.1 cm，黏度为 3.0 Pa·s，胶粉改性沥青综合性能良好。

参考文献(References):

[1] 杨三强,周晓雨,闰明涛,等. 废旧胶粉掺量对改性沥青溶胀机理的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(4): 17-22. (YANG San-qiang, ZHOU Xiao-yu, RUN Ming-tao, et al. Microscopic characteristics of rubber modified asphalt in different rubber powder content[J]. Journal of Changsha University of Science &

- Technology(Natural Science), 2018, 15(4): 17-22. (in Chinese))
- [2] 冯明林,冯正翔,郑伟,等. 橡胶沥青性能试验及影响因素分析[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 33-37,55. (FENG Ming-lin, FENG Zheng-xiang, ZHENG Wei, et al. Rubber asphalt performance test and analysis of influencing factors[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 33-37,55.(in Chinese))
- [3] 刘斌,胡省. 废橡胶粉/SBS复合改性沥青技术性能研究[J]. 公路工程,2019,44(6):257-260.(LIU Bin,HU Sheng. Study on technical performance of waste rubber powder/SBS composite modified asphalt[J]. Highway Engineering,2019,44(6):257-260.(in Chinese))
- [4] 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. (WANG Xiao-feng, LYU Xiao-wu, CHU Fu-ke, et al. Performance characteristics analyses of asphalt modified by different types of rubber powder and SBS[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(11): 3695-3702.(in Chinese))
- [5] 马万,邓宝智. 不同胶粉掺量的橡胶沥青黏弹性能评价[J]. 公路,2018,63(10):109-113.(MA Wan,DENG Bao-zhi. Evaluation of viscoelastic properties of rubber asphalt with different rubber powder content[J].Highway,2018,63(10):109-113.(in Chinese))
- [6] 王辉,邓乔,罗建军,等. 橡胶粉的掺量与细度对沥青性能的影响研究[J]. 中外公路,2017,37(4):259-262.(WANG Hui,DENG Qiao,LUO Jian-jun,et al.Influence of rubber powder content and fineness on asphalt performance[J]. Journal of China & Foreign Highway,2017, 37(4): 259-262.(in Chinese))
- [7] 王艳,张爱珍,任春生. 正交试验设计与优化的理论基础与应用进展[J]. 分析试验室, 2008, 27(S2): 333-334. (WANG Yan, ZHANG Ai-zhen, REN Chun-sheng. Theoretical basis and application progress of orthogonal experimental design and optimization[J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2008, 27(S2): 333-334. (in Chinese))
- [8] 郭寅川,赵宾,申爱琴,等. 基于正交设计法的橡胶沥青性能试验研究[J]. 公路交通科技,2017,34(2):7-14.(GUO Yin-chuan,ZHAO Bin, SHEN Ai-qin, et al. Experimental study on performance of rubber asphalt based on orthogonal design method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2017,34(2):7-14.(in Chinese))
- [9] 李永丽,楚万强. 橡胶粉改性沥青性能优化实验与作用机理分析[J]. 公路工程,2014,39(4):276-281.(LI Yong-li, CHU Wan-qiang. Study on performance optimization experiments and modification mechanism of rubber modified asphalt[J]. Highway Engineering, 2014, 39(4): 276-281.(in Chinese))
- [10] 高琼,田军. 正交设计法在环保型橡胶沥青试验配比中的应用研究[J]. 公路工程,2019, 44(6): 115-118. (GAO Qiong, TIAN Jun. Study on the application of orthogonal design method in the matching of environmental protection rubber asphalt test[J]. Highway Engineering, 2019,44(6):115-118.(in Chinese))
- [11] 杨国林,肖绪荡,王朝辉,等. 排水抗滑磨耗层冷拌沥青混合料的级配设计及性能[J]. 筑路机械与施工机械化, 2019, 36(7): 64-67,72. (YANG Guo-lin, XIAO Xu-dang, WANG Chao-hui, et al. Gradation design and performance of cold mix asphalt mixture for drainage and antisliding wearing course[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2019, 36(7): 64-67, 72. (in Chinese))