

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.016

文章编号:1672-9331(2022)04-0161-10

引用格式:李闯民,胡张勇,甘有为,等.热解炭黑沥青混合料添加剂最佳掺量试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):161-170.

Citation: LI Chuangmin, HU Zhangyong, GAN Youwei, et al. Experimental study on optimum additive content of pyrolytic carbon black asphalt mixture[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 161-170.

热解炭黑沥青混合料添加剂最佳掺量试验研究

李闯民^{1,2}, 胡张勇^{1,2}, 甘有为^{1,2}, 杨晚生³, 甘新众³

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114;2.长沙理工大学 道路结构与材料交通行业
重点实验室,湖南长沙 410114;3.宜春市公路事业发展中心,江西宜春 336000)

摘要:【目的】探究废轮胎热解炭黑(TPCB)添加剂在沥青混合料中的最佳掺量,改善沥青混合料的综合性能。【方法】利用基于中心复合设计的响应曲面法(RSM)进行试验设计,对成型的马歇尔试件进行相关试验,分析试件制备参数对沥青混合料性能的影响并对响应变量进行数学建模预测。【结果】TPCB的加入显著提高了沥青混合料的高温稳定性,4.56%的沥青和5.32%的TPCB为最佳掺量,采用模型预测的结果与试验结果吻合良好。【结论】RSM可有效适用于沥青混合料领域,TPCB作为沥青混合料添加剂有着广阔的应用前景。

关键词:废轮胎热解炭黑添加剂;最佳掺量;响应曲面法;沥青混合料;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

随着我国交通运输行业的蓬勃发展,道路里程及车辆数量大幅度增长,每年丢弃的废旧轮胎约2.39亿个^[1],如果不妥善处理这些废旧轮胎,将不可避免地造成环境污染和资源浪费。目前,处理废旧轮胎的主流技术有以下几种:直接利用、翻新再利用、生产再生胶(或胶粉)、热解和代替燃料等^[2]。其中,热解技术具有减量化、无害化、资源化及综合利用率高等一系列优点。在无氧条件下,利用热解技术可从废旧轮胎中生成炭黑、热解油、可燃气和钢丝,其关键产品是废轮胎热解炭黑(tires pyrolysis carbon black, TPCB)^[3]。因此,拓宽TPCB的应用范围十

分重要。

近年来,将TPCB用作沥青混合料添加剂的研究逐渐开展,这些研究都是扩大TPCB应用领域的良好开端。LI等^[4]研究了TPCB对沥青混合料路用性能的影响,发现TPCB可显著提高沥青混合料的抗车辙性能。李因翔等^[5]研究发现TPCB能够提升沥青混合料的高温性能,增加其弹性和抗塑性变形的能力,但会降低其低温性能。CHEN等^[6]从微观的角度分析了TPCB对沥青混合料的作用机理,发现TPCB始终以多层结构分布在沥青中,且各层的层间距基本保持不变,这表明TPCB具有良好的热稳定性和结构稳定性。综上所述,在沥青混合料中添加适量的TPCB能够提升沥青混合料的高温稳定性和抗老化性能。但这些研究

收稿日期:2021-12-06;修回日期:2022-03-16;接受日期:2022-03-27

基金项目:长沙市科技计划项目(kq2004065);江西省交通运输厅科技项目(2020H0023);长沙理工大学研究生科研创新项目(SJCX202008)

通信作者:李闯民(1965—)(ORCID:0000-0002-9069-6763),男,教授,主要从事路基、路面工程方面的研究。

E-mail:13875908009@126.com

都是通过传统方法开展试验的,即先固定其中一个因素,再改变其他因素进行试验,这种方法无法通过试验确定各因素之间的相互作用。因此,为对沥青混合料的各项指标进行综合评价,需探究一种可以反映各因素之间相互作用的、合理高效的方法。

响应曲面法(response surface methodology, RSM)是一种基于数理统计的试验设计方法,主要在较少的试验运行次数情况下评估不同因子(自变量)的个体效应和交互效应,并用以完成试验设计、建立数学模型和过程因子优化^[7]。RSM已有效地应用在各个领域^[7-11],包括水泥混凝土技术、冶金材料、机械工程以及生物科学等。最近,RSM在沥青混合料设计中的应用也得到了越来越多的认可。程永春等^[12]应用RSM评估沥青玛蹄脂碎石混合料的强度和体积特性,并确定了最佳油石比。SOLTANI等^[13]使用RSM研究了外加应力和温度对聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)改性沥青混合料疲劳寿命的影响。此外,郭玉金等^[14]通过RSM确定了化学反应性复合改性沥青各改性剂的最优掺量。以上研究表明,RSM可有效应用于沥青混合料的试验设计及结果分析。

与建立线性数学模型的正交设计方法相比,RSM可采用非线性模型,求得更高精度的回归方程,进行更加合理的预测^[15]。因此,本研究采用RSM统计技术,设计了基于中心复合设计的两因素三水平共13组试验,并根据试验数据构建数学模型进行预测分析;同时结合强度、体积参数和高温稳定性进行基于性能的配合比设计,研究沥青用量和TPCB掺量对沥青混合料性能的影响规律,并确定TPCB的最佳掺量,为TPCB实体工程的推广应用提供技术参考。

1 试验材料和方法

1.1 沥青

试验选用的基质沥青为萍乡70#A级道路石油沥青,其技术指标见表1。

表1 基质沥青技术指标

Table 1 Technical indicators of asphalt

检测项目	基质沥青	技术要求	试验方法
针入度(100 g, 5 s, 25 °C)/(0.1 mm)	72.0	60~80	T0604-2011
针入度指数	-1.1	-1.5~1.0	T0604-2011
软化点/°C	47.5	≥46	T0606-2011
60 °C动力黏度/(Pa·s)	227	≥180	T0620-2000
延度(5 cm/min, 15 °C)/cm	150	≥100	T0605-2011
密度(15 °C)/(g·cm ⁻³)	1.036	实测记录	T0603-2011

1.2 集料和填料

粗集料采用萍乡新越产的粒径为12~18、6~12和3~6 mm的石灰岩,细集料采用萍乡东原料场的粒径为0~3 mm的机制砂,填料为石灰岩磨细矿粉。粗集料、细集料及填料的技术指标分别见表2~4。本研究采用AC-13型密级配沥青混合料,根据相关规范对AC-13混合料级配范围的要求进行级配设计,确定的矿料合成级配见表5。

表2 粗集料技术指标

Table 2 Technical indicators of coarse aggregate

检测项目	检测结果			试验方法
	12~18 mm	6~12 mm	3~6 mm	
石料压碎值/%	22	23	22	T0316-2005
洛杉矶磨耗损失/%	21	21	21	T0317-2005
毛体积相对密度	2.691	2.637	2.549	T0304-2005
表观相对密度	2.702	2.653	2.651	T0304-2005

表3 细集料技术指标

Table 3 Technical indicators of fine aggregate

检测项目	检测结果	试验方法
表观相对密度	2.730	T0328-2005
砂当量/%	50.8	T0345-2005

表4 矿粉技术指标

Table 4 Technical indicators of mineral powder

检测项目	技术要求	检测结果	试验方法
表观密度/(g·cm ⁻³)	≥2.5	2.718	T0352-2000
外观	无团粒结块	无团粒结块	—
亲水系数	<1	0.67	T0353-2000
塑性指数	<4	3.8	T0354-2000
加热安定性	实测记录	无变化	T0355-2000

表5 AC-13级配范围及设计级配
Table 5 AC-13 grading range and design grading

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量分数									
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
上限	100.0	100.0	80.0	53.0	40.0	27.0	19.0	15.0	10.0	8.0
下限	100.0	90.0	68.0	42.0	28.0	15.0	10.0	7.0	5.0	4.0
中值	100.0	95.0	74.0	47.5	34.0	21.0	14.5	11.0	7.5	6.0
设计级配	100.0	90.9	78.5	47.5	28.5	20.9	15.8	12.0	8.6	7.1

1.3 废轮胎热解炭黑

本研究采用上海金匙公司生产的TPCB,根据文献[16]对其技术指标进行检测,检测结果见表6。从表6可以看出,其各项检测结果均满足规范技术要求。

表6 TPCB添加剂技术指标
Table 6 Technical indicators of TPCB

检测项目	技术要求	检测结果	试验方法
外观	黑色粉末状	黑色粉末	目测
灰分/%	≤18.5	15.02	JTG E20/T 0614
吸碘值/(mg·g ⁻¹)	≥80	85.1	GB/T 3780.1
含水率/%	≤3.0	1.5	JTG E20/T 0103
吸油值/(10 ⁻² mL·g ⁻¹)	≥70	87.1	GB/T 3780.2
pH	≥6.0	7.68	GB/T 3780.7
粒度(0.045 mm通过率)/%	100	100	JTG E42/T 0302

1.4 TPCB干法制备工艺

为了便于TPCB在实体工程中的推广应用,本研究使用干法制备TPCB改性沥青混合料以模拟施工的实际情况。TPCB改性沥青混合料的干法制备工艺如下:先把基质沥青加热到160℃,拌锅预热到170℃,然后将按配合比设计好的粗、细集料加入拌锅,同时加入TPCB一起干拌15s,再加入基质沥青湿拌90s,最后加入填料拌和均匀。

1.5 试验方法

RSM是一种统计方法,可用于试验设计,其利用数学概念建立各种独立因子与一个或多个响应之间的关系^[17]。本研究使用Design-Expert 12软件进行试验设计、构建数学模型和响应的统计分析,并获得响应的最佳解决方案。

基于文献[4]的研究成果,本研究选择沥青用量A和TPCB掺量B两个独立因子,沥青用量和TPCB掺量都是相对于矿料质量的比例,沥青用量A取4.0%、4.5%和5.0%,TPCB掺量B取2.0%、

4.5%、7.0%。把空隙率、马歇尔稳定度、流值和动稳定度作为RSM分析的响应值,对于每个响应值,按随机顺序进行测试,运行总数为13次(由4k+5计算得到,其中k是独立因子的数量,k=2)。将中心点复制5次,可更好地分析、估计试验误差。式(1)中所示的多项式模型用于计算响应变量。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (1)$$

式中:y为预测响应值; β_0 为截距; β_i 、 β_{ii} 为独立因子 x_i 的一阶和二阶效应($i=1, \dots, n$); β_{ij} 为相互作用影响因素($i=1, \dots, n; j=2, \dots, n$); X_i 、 X_j 为编码因子; ε 为误差;n为用于分析的因子数。

此外,为了评估拟合模型的可行性,本研究进行了方差分析,并评估了独立因子的显著性及其与响应因子的相互作用。

2 统计分析与响应分析

2.1 统计分析

表7为试验设计的布局 and 所有响应值的试验结果。在对各响应值进行回归分析后,为其生成了拟合的二次多项式方程,如式(2)~(5)所示。

$$P_{VV} = 17.74 - 3.783A + 0.036B + 0.2248A^2 - 0.00141B^2 + 0.0021AB \quad (2)$$

$$S_{MS} = -44.09 + 24.71A + 0.722B - 2.831A^2 - 0.0636B^2 + 0.026AB \quad (3)$$

$$D_{FL} = -2.53 + 1.498A - 0.2232B - 0.0359A^2 + 0.0242B^2 - 0.002AB \quad (4)$$

$$S_{DS} = -24290 + 12538A + 148.7B - 1427.7A^2 - 17.27B^2 + 3.8AB \quad (5)$$

式中:A为沥青用量,%;B为TPCB掺量,%₀;P_{VV}为空隙率,%;S_{MS}为稳定度,kN;D_{FL}为流值,mm;S_{DS}为动稳定度,次/mm。

表7 试验设计布局及试验结果

Table 7 Experimental design layout and experimental result

试验编号	自变量		响应值			
	沥青用量 A/%	TPCB掺量 B/‰	空隙率/ %	稳定度/ kN	流值/ mm	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)
1	4.0	7.0	6.92	10.61	2.46	3 315
2	4.5	4.5	5.34	11.31	2.86	3 631
3	4.5	4.5	5.40	11.22	2.99	3 614
4	4.0	2.0	6.74	10.43	2.52	3 276
5	4.5	2.0	5.18	10.65	3.13	3 468
6	5.0	4.5	4.24	9.89	3.52	3 089
7	4.5	7.0	5.45	10.91	3.04	3 527
8	5.0	7.0	4.45	9.80	3.61	3 042
9	4.5	4.5	5.26	11.17	2.89	3 605
10	5.0	2.0	4.08	9.75	3.68	2 984
11	4.5	4.5	5.46	11.26	2.94	3 622
12	4.0	4.5	6.85	11.05	2.33	3 408
13	4.5	4.5	5.47	11.28	2.95	3 619

检查模型的可靠性是数据分析的重要组成部分。如果拟合不充分,模型函数将给出不正确的响应。因此,为了评估模型的显著性和充分性,本研究进行了方差分析。表8为回归方程的方差检

验结果,表中 F 为对回归模型整体的方差检验, P 为判断 F 检验是否显著的标准,当 $P < 0.05$ 时表示模型和参数在评估响应值时具有显著性。由于对每个模型的方差都分析出了一些不重要的相互作

表8 回归方程方差检验

Table 8 Regression equation variance test

响应值	来源	自由度	平方和	均方差	F 值	P 值	显著性
空隙率	模型	5	4.676	0.935	1 976.21	<0.001	显著
	A	1	0.209	0.209	440.73	<0.001	显著
	B	1	0.001	0.001	0.11	0.750	不显著
	A^2	1	0.009	0.009	18.44	0.004	显著
	B^2	1	0.001	0.001	0.45	0.523	不显著
	AB	1	0.012	0.012	9.43	0.013	显著
	误差	7	0.003	0.005	—	—	—
	失拟项	3	0.001	0.001	0.61	0.646	不显著
	纯误差	4	0.002	0.001	—	—	—
	合计	12	4.679	—	—	—	—
稳定度	模型	5	4.037	0.807	62.18	<0.001	显著
	A	1	1.317	1.317	101.41	<0.001	显著
	B	1	0.389	0.389	30.00	0.003	显著
	A^2	1	1.383	1.384	106.54	<0.001	显著
	B^2	1	0.437	0.437	33.65	0.012	显著
	AB	1	0.004	0.004	0.33	0.586	不显著
	误差	7	0.091	0.013	—	—	—
	失拟项	3	0.079	0.026	8.87	0.051	不显著
	纯误差	4	0.012	0.003	—	—	—
	合计	12	4.128	—	—	—	—
流值	模型	5	2.120	0.424	262.14	<0.001	显著
	A	1	0.111	0.111	68.60	<0.001	显著
	B	1	0.053	0.053	32.55	0.002	显著
	A^2	1	0.001	0.001	0.14	0.722	不显著
	B^2	1	0.063	0.063	38.94	<0.001	显著
	AB	1	0.001	0.001	0.02	0.905	不显著
	误差	7	0.011	0.002	—	—	—
	失拟项	3	0.001	0.001	0.10	0.955	不显著
	纯误差	4	0.010	0.003	—	—	—
	合计	12	2.132	—	—	—	—

续表 8

动稳定度	模型	5	678 452	135 690	711.96	<0.001	显著
	A	1	256 206	256 206	1 344.29	<0.001	显著
	B	1	26 563	26 563	139.37	<0.001	显著
	A ²	1	351 866	351 866	1 846.21	<0.001	显著
	B ²	1	32 174	32 174	168.81	<0.001	显著
	AB	1	90	90	0.47	0.514	不显著
	误差	7	1 334	191	—	—	—
	失拟项	3	963	321	3.46	0.131	不显著
	纯误差	4	371	93	—	—	—
	合计	12	679 786	—	—	—	—

用($P>0.01$),为了改进模型以及优化结果,从模型中剔除这些不重要的项,优化后的公式如式(6)~(9)所示。

$$P_{VV} = 4.57 - 0.851 3A + 0.052 9A^2 - 0.07AB \quad (6)$$

$$S_{MS} = -43.56 + 24.6A + 0.605 4B - 2.831A^2 - 0.063 6B^2 \quad (7)$$

$$D_{FL} = -1.78 + 1.166 7A - 0.227 2B + 0.024 7B^2 \quad (8)$$

$$S_{DS} = -24 367 + 12 555A + 165.8B - 1 427.7A^2 - 17.27B^2 \quad (9)$$

为检验模型回归系数的适用性,计算了决定系数 R^2 、调整后的决定系数 R^2_{λ} 和信噪比,如表 9 所示。较高的 R^2 和 R^2_{λ} 表明预测值和实际值之间有良好的—致性;信噪比是信号与噪声的比值,表示测量的精度,其值大于 4 表示测量结果是理想的。空隙率、稳定度、流值和动稳定度的信噪比分别是 61.51、24.08、24.59 和 77.12,这表明实测值与预测值之间的差异性较小,方程的拟合性较好,采用该模型预测出的响应值能够较好地反映实际数值。

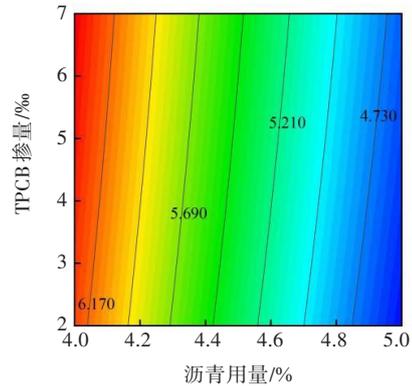
表 9 模型统计分析

Table 9 Model statistical analysis

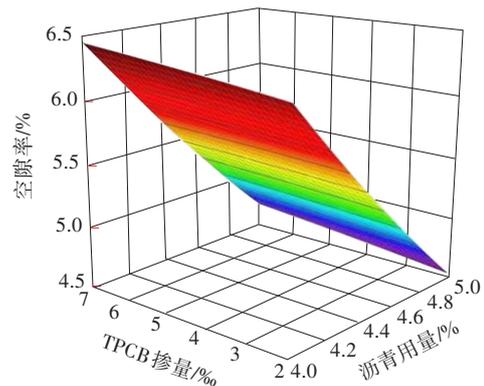
响应值	R^2	R^2_{λ}	预测 R^2	信噪比
空隙率	99.49	99.32	97.70	61.51
稳定度	97.70	96.54	91.25	24.08
流值	96.51	95.35	92.45	24.59
动稳定度	99.79	99.69	99.30	77.12

2.2 体积参数、强度特性和高温路用性能响应分析

本文采用 RSM 研究了沥青用量 A 和 TPCB 掺量 B 对 AC-13 沥青混合料体积参数、强度特性和高温路用性能的影响,使用等高线图和响应曲面图分析了自变量 A 和 B 与空隙率、稳定度、流值和动稳定度等响应值之间的相互关系。



(a) 等高线图



(b) 响应曲面图

图 1 空隙率的等高线图和响应曲面图

Fig. 1 Contour diagram and response surface diagram of voidage

2.2.1 空隙率

图 1 所示为空隙率与沥青用量和 TPCB 掺量之间的关系。从图 1(a)可以看出,空隙率随着沥青用量从 4.0% 增加到 5.0% 而逐渐降低,此外,当 TPCB 掺量从 2‰ 增加到 7‰ 时,空隙率略有增加,这可能是由于 TPCB 的流动性不及沥青,在混合料压实过程中未及时填充空隙,导致随着 TPCB 掺量的增加空隙率也随之上升。从图 1(b)可以看出,沥青用量对空隙率的影响更大,因为与 TPCB 掺量相比,随着沥青用量的增加,空隙率变化幅度更

大。空隙率随着沥青用量的增加而减少,对于沥青用量而言,没有出现明显的最佳区域。

2.2.2 稳定度

稳定度是表示沥青混合料承受交通荷载能力的最重要参数。对于沥青混合料的设计,面层需要足够的稳定性,以承受不同程度的交通荷载。图2(a)所示为二维椭圆形等高线图,这表明自变量之间存在良好的相互作用关系,沥青用量和TPCB掺量的增加均对稳定性有显著影响。沥青用量从4.0%增加到4.4%时,稳定度显著增加,然而当沥青用量从4.4%继续增加时,稳定度却随之降低,这表明稳定度的最佳区域位于沥青用量为4.4%左右,TPCB掺量为4.5%左右。图2(a)还表明,沥青用量和TPCB掺量对稳定度均具有显著的交互作用。从图2(b)可以看出,沥青用量面的曲率比TPCB掺量面的更陡峭,这表明沥青用量对稳

定性的影响更大。

2.2.3 流值

流值可以反映沥青混合料适应荷载产生的逐渐沉降和移动而不会开裂的能力。图3为基于RSM分析流值的等高线图和曲面图。由图3(a)可知,自变量沥青用量和TPCB掺量的单独影响是显著的,流值随着沥青用量的增加而增加,对于沥青用量而言,没有出现明显的最佳区域。从图3(b)可以看出,流值随着TPCB掺量的增加先减小后增加,在TPCB掺量为4.4%左右时流值最小。

2.2.4 动稳定度

在南方高温季节,车辙是最常见的一种路面病害,动稳定度是表征沥青混合料抵抗该病害的一个很重要的指标^[18]。图4为基于RSM分析动稳定度的等高线图和响应曲面图。由图4可知,自变量沥青用量和TPCB掺量的交互影响是显著的。

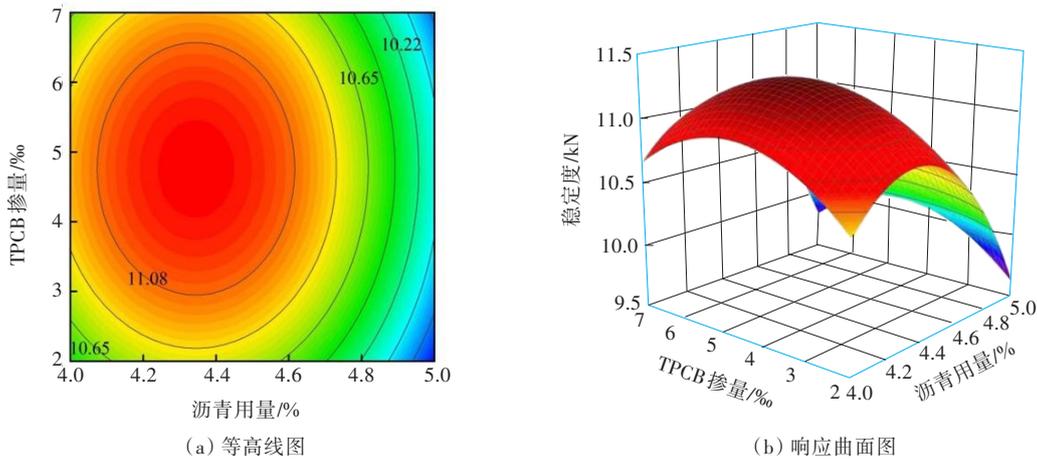


图2 稳定度的等高线图和响应曲面图

Fig. 2 Contour diagram and response surface diagram of stability

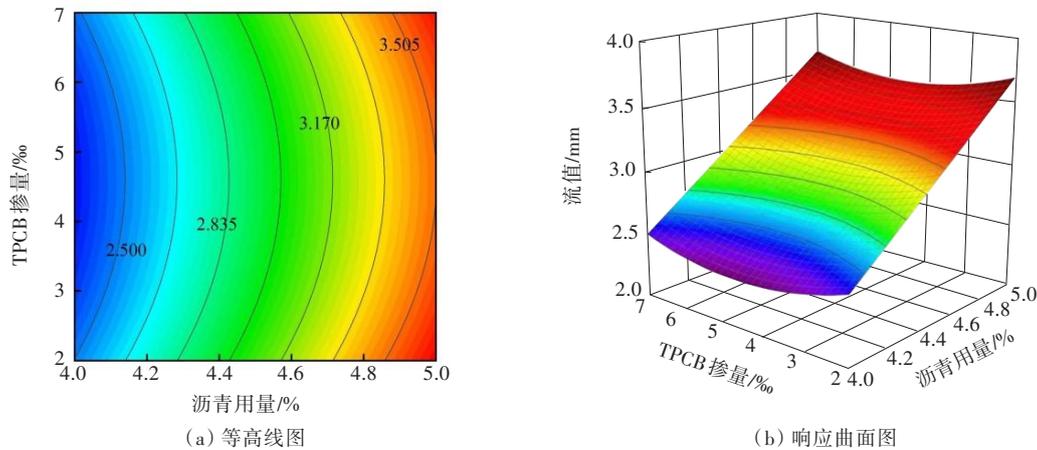


图3 流值的等高线图和响应曲面图

Fig. 3 Contour diagram and response surface diagram of flow

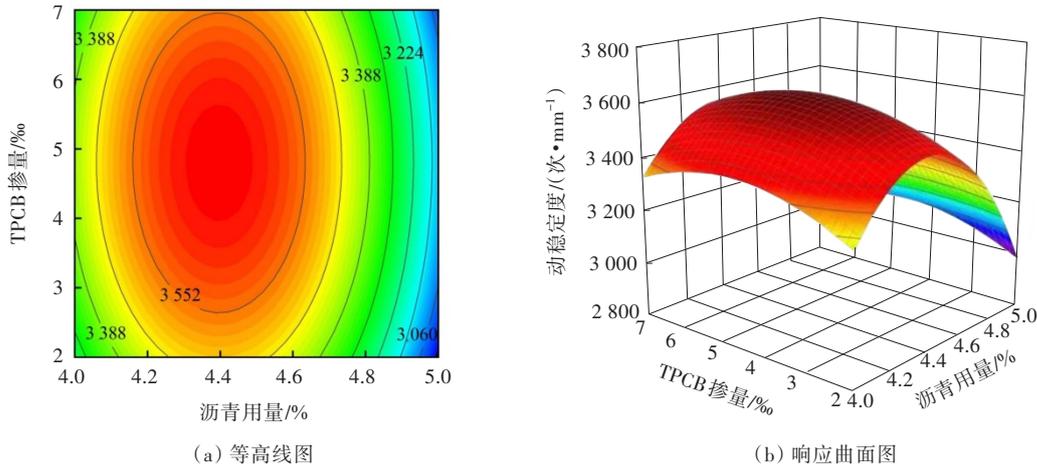


图 4 动稳定度的等高线图和响应曲面图

Fig. 4 Contour diagram and response surface diagram of dynamic stability

随着沥青用量和TPCB掺量的增加,动稳定度也随之提高,最大提高了约20%,到达峰值后逐渐减小,在沥青用量为4.4%和TPCB掺量为4.8%附近出现了明显的最佳区域;由图4(b)可以看出,沥青用量面的曲率比TPCB掺量面的陡峭,这表明沥青用量对动稳定度的影响更大。

2.3 最佳条件研究

为确定沥青和TPCB的最佳掺量,以获得混合料综合性能最佳时的响应变量为前提,并满足混合料马歇尔试验技术标准,本研究使用Design-Expert 12软件进行了多响应优化,目标值根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)选择。将稳定度及动稳定度设置为最大值,以实现沥青混合料高温稳定性方面的性能优化。为了应对南方夏季炎热多雨、重载交通较多的情况,将5.1%的空隙率作为合理空隙率,流值满足规范1.5~4.0 mm的要求。RSM软件选择了组合期望值最高为0.90的最佳解决方案。结果表明:沥青和TPCB的最佳掺量分别为4.56%和5.32%。然后根据优化结果进行相关试验,以验证优化结果和响应的准确性。

模型预测值和实测值之间的误差百分比使用式(10)计算得出。表10列出了最佳条件下的预测值与实测值,由表10可知,空隙率、稳定度、流值和动稳定度的相对误差都小于5%,这表明预测响应值与试验实测值的结果非常吻合。

$$\varepsilon = \frac{(M_1 - M_0)}{M_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中:ε为误差,%;M₀为预测值;M₁为实测值。

表 10 在最佳条件下的预测与实测结果

Table 10 Prediction and experimental results under optimal conditions

项目	响应值			
	空隙率/ %	稳定度/ kN	流值/ mm	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)
取值范围	5.10	最大值	1.5~4.0	最大值
预测值	5.31	11.17	3.00	3 595
实测值	5.12	11.32	2.94	3 626
误差/%	-3.71	1.33	-2.04	0.85

3 讨论

在我国南方高温地区,沥青路面容易产生车辙。为解决这一病害,以往研究通常采用对沥青混合料进行改性的方法,以提高其抗车辙及水稳定性能^[19]。一方面,以往的抗车辙类添加剂虽取得了较好的使用效果,但材料成本较高,对于造价低的道路难以推广使用。另一方面,大量的废旧轮胎热解产物缺乏大规模的应用,这些热解产物得不到充分利用既浪费资源,又对环境造成污染。传统的沥青混合料设计方法是通过改变单一变量的水平来观察其对响应变量的影响,该方法需要进行大量的试验,从而造成时间与资源的浪费^[20]。因此,本研究通过探究更加科学的试验设计方法,建立TPCB用于沥青路面材料设计的性能预测模型,以获得工程背景中资源、成本与性能的最优解。

本研究将RSM统计技术引入到沥青混合料设计中,利用合理的试验设计,采用二次回归方程拟

合得到影响因素与各响应值之间的函数关系,分析了沥青用量和TPCB掺量对沥青混合料性能的影响规律,并通过对回归方程的分析寻求最优条件参数,解决了多变量问题。通过试验与预测结果的对比,验证模型的可靠性,为TPCB在沥青混合料中的应用提供新思路和新方法。

与传统的沥青混合料设计方法相比,本研究采用的方法不仅能通过计算机技术构建三维模型,以更直观地全面分析各因素对响应值的影响程度和影响规律,还可以较为科学精准地取得各因素基于沥青混合料体积参数、强度和路用性能的最佳值。

试验结果表明:TPCB的掺量对混合料的高温稳定性影响特别显著,合适的TPCB掺量不仅可以有效提升沥青混合料的高温性能,还能合理利用热解产物TPCB,减少沥青用量,从而达到保护环境、节约成本的目的^[5]。因此,TPCB沥青混合料添加剂非常适用于我国南方高温地区,TPCB的加入能够在很大程度上减少路面高温车辙病害的产生,但对TPCB的现场施工工艺技术还有待深入研究,以便TPCB在实体工程中推广应用。

4 结论

本研究提出用TPCB作为沥青混合料的添加剂,采用RSM进行了试验和统计分析,研究分析了沥青用量和TPCB掺量对沥青混合料的体积参数、强度和高温路用性能的影响,得出以下结论:

1) 方差分析结果表明:实测值与预测值之间的差异性很小,方程的拟合性较好,预测出的响应值能够反映实际数值,RSM可以较好地适用于沥青混合料领域。

2) TPCB的加入可以提高沥青混合料马歇尔稳定度和高温稳定性,同时降低其流值。

3) 4.56%的沥青用量和5.32%的TPCB掺量的沥青混合料不仅可以满足马歇尔配合比设计要求,且混合料的性能达到最优。

〔参考文献〕

- [1] 邱敬贤,何曦,戴欣,等.废旧轮胎处理技术的研究进展[J].中国环保产业,2020(12):18-22.DOI:10.3969/j.issn.1006-5377.2020.12.006.
- [2] 蒋智慧,刘洋,宋永猛,等.废旧轮胎热解及热解产物研究展望[J].化工进展,2021,40(1):515-525.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0559.
- [3] HITA I, ARABIOURRUTIA M, OLAZAR M, et al. Opportunities and barriers for producing high quality fuels from the pyrolysis of scrap tires[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,56:745-759.DOI:10.1016/j.rser.2015.11.081.
- [4] LI C, FAN Z, WU S, et al. Effect of carbon black nanoparticles from the pyrolysis of discarded tires on the performance of asphalt and its mixtures[J]. Applied Sciences,2018,8(4):624.DOI:10.3390/app8040624.
- [5] 李因翔,陈洪庆,李闯民,等.废旧轮胎热解炭黑改性沥青性能室内试验研究[J].中外公路,2021,41(2):296-301.DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.059.
- [6] LI Yinxiang, CHEN Hongqing, LI Chuangmin, et al. Laboratory test on performance of pyrolytic carbon black asphalt modified with waste tire[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(2):296-301.DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.02.059.
- [7] CHEN A Q, DENG Q H, LI Y Y, et al. Harmless treatment and environmentally friendly application of waste tires: TPCB/TPO composite-modified bitumen[J]. Construction and Building Materials,2022,325:126785.DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.126785.
- [8] BALA N, NAPIAH M, KAMARUDDIN I. Nanosilica composite asphalt mixtures performance-based design and optimisation using response surface methodology[J]. International Journal of Pavement Engineering,2020,21(1):29-40.DOI:10.1080/10298436.2018.1435881.
- [9] 王志航,白二雷,许金余,等.基于响应曲面法的纳米颗粒增强水泥浆体制备研究[J].硅酸盐通报,2021,40(12):3918-3926. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625. 20211101.001.
- [10] WANG Zhihang, BAI Erlei, XU Jinyu, et al. Preparation of nano-particles reinforced cement paste based on response surface method[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(12): 3918-3926. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20211101.001.
- [11] 易正明,刘强,覃佳卓,等.基于响应曲面法的烧结孔隙优化[J].中国冶金,2022,32(1):64-71.DOI:10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20210272.

- YI Zhengming, LIU Qiang, QIN Jiazhuo, et al. Sintered pore optimization based on response surface method[J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(1): 64–71. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20210272.
- [10] 张帅帅,张彦敏,韩文奎,等.基于响应曲面法的QCr0.5铜合金热挤压冲头磨损数值分析[J].*塑性工程学报*, 2021,28(9):80–85. DOI:10.3969/j.issn.1007-2012.2021.09.011.
ZHANG Shuashuai, ZHANG Yanmin, HAN Wenkui, et al. Numerical analysis of punch wear of QCr0.5 copper alloy in hot extrusion based on response surface method [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2021, 28(9): 80–85. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2021.09.011.
- [11] 黄硕,胡雨欣,沙露平,等.响应曲面法优化植物甾醇固体自微乳的工艺条件[J].*过程工程学报*, 2022, 22(4): 533–541. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.221127.
HUANG Shuo, HU Yuxin, SHA Luping, et al. Optimization of the technological conditions of phytosterol solid self-microemulsion using response surface methodology[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2022, 22(4): 533–541. DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.221127.
- [12] 程永春,徐志枢,马桂荣,等.基于响应曲面法的SMA沥青混合料试验研究[J].*应用基础与工程科学学报*, 2021, 29(2): 493–502. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.02.021.
CHENG Yongchun, XU Zhishu, MA Guirong, et al. Response surface method for asphalt mixture design[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2021, 29(2): 493–502. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2021.02.021.
- [13] SOLTANI M, MOGHADDAM T B, KARIM M R, et al. Analysis of fatigue properties of unmodified and polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 58: 238–248. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.09.005.
- [14] 郭玉金,宋辉,张清峰,等.基于改进响应曲面法的化学反应性复合改性沥青最优配方研究[J].*交通科技*, 2019(3): 119–123. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2019.03.032.
GUO Yujin, SONG Hui, ZHANG Qingfeng, et al. Study on the optimum formula of chemically reactive composite modified asphalt based on improved response surface methodology[J]. *Transportation Science & Technology*, 2019(3): 119–123. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7570.2019.03.032.
- [15] BALA N, NAPIAH M, KAMARUDDIN I. Nanosilica composite asphalt mixtures performance-based design and optimisation using response surface methodology[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2020, 21(1): 29–40. DOI: 10.1080/10298436.2018.1435881.
- [16] 全国交通工程设施(公路)标准化技术委员会. 沥青混合料改性添加剂 第7部分 废旧轮胎热解炭黑: JT/T 860.7—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
National Traffic Engineering Facilities (Highway) Standardization Technical Committee. Modifier for asphalt mixture part 7: pyrolytic carbon black from used tire: JT/T 860.7—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [17] BAGHAE MOGHADDAM T, SOLTANI M, KARIM M R, et al. Optimization of asphalt and modifier contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology[J]. *Measurement*, 2015, 74: 159–169. DOI: 10.1016/j.measurement.2015.07.012.
- [18] 查旭东,樊小林,刘安辉,等. RIOHTrack 中面层沥青混合料高温性能 SPT 试验[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 18(1): 16–23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.003.
ZHA Xudong, FAN Xiaolin, LIU Anhui, et al. SPT test of high temperature performance of asphalt mixture in middle surface layer of RIOHTrack[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2021, 18(1): 16–23. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2021.01.003.
- [19] 尹建伟,薛冰. WTR/APAO 复合改性沥青混合料性能研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1): 27–33. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.004.
YIN Jianwei, XUE Bing. Study on performance of WTR/APAO composite modified asphalt mixture[J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2022, 19(1): 27–33. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.004.
- [20] 倪萍. 玄武岩纤维 SMA-13 混合料设计及路用性能试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
NI Ping. Study on design and pavement performance experiment of basalt fiber SMA-13 mixture[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

Experimental study on optimum additive content of pyrolytic carbon black asphalt mixture

LI Chuangmin^{1,2}, HU Zhangyong^{1,2}, GAN Youwei^{1,2}, YANG Wansheng³, GAN Xinzong³
(1.School of Traffic and Transportation Engineering,Changsha University of Science & Technology,Changsha 410114, China;2.Key Laboratory of Road Structure and Materials Transportation Industry,Changsha University of Science & Technology,Changsha 410114,China;3.Yichun Highway Development Center, Yichun 336000, China)

Abstract: [Purposes] This work aims to optimize the dosage of waste tire pyrolysis carbon black(TPCB) additive in asphalt mixture to improve the comprehensive performance. [Methods] First, the response surface method (RSM) based on the central composite design was used for experimental design, and relevant tests were carried out on the formed Marshall specimen. Then, the influence of preparation parameters was analyzed, and the response variables was predicted by mathematical modeling. [Findings] The results showed that adding TPCB significantly improved the high-temperature stability of the asphalt mixture, and 4.56% asphalt and 5.32% TPCB were the optimal dosages. The results predicted by the established model agreed with the experimental results. [Conclusions] Therefore, RSM could also be effectively applied in the field of asphalt mixture, and TPCB asphalt mixture additive had a broad application prospect.

Key words: tires pyrolysis carbon black additive; optimal mixing amount; response surface method; asphalt mixture; road performance

Manuscript received: 2021-12-06; **revised:** 2022-03-16; **accepted:** 2022-03-27

Foundation item: Project (kq2004065) supported by Science and Technology Plan Program of Changsha; Project (2020H0023) supported by Science and Technology Program of Department Transportation of Jiangxi Province; Project (SJCX202008) supported by Graduate Research Innovation of Changsha University of Science & Technology

Corresponding author: LI Chuangmin (1965—)(ORCID:0000-0002-9069-6763), male, professor, research interest: roadbed and pavement engineering.E-mail:13875908009@126.com

(责任编辑:刘平;校对:石月珍;英文编辑:田湘)