



粉煤灰/玄武岩纤维改性沥青混合料配合比优化研究

俞烨炜¹,王修山²,李震南¹,刘 淇¹,胡奕琦¹

(1. 浙江理工大学建筑工程学院,杭州 310018;2. 浙江建设职业技术学院建筑设备学院,杭州 311231)

摘 要: 为优化粉煤灰和玄武岩纤维沥青混合料的配合比,分析粉煤灰和玄武岩纤维对沥青混合料的路用性能提升效果,将玄武岩纤维掺量、粉煤灰掺量和油石比作为影响因素,通过响应曲面分析得出混合料最优掺量;然后通过马歇尔试验、浸水马歇尔试验、低温小梁弯曲试验,对配合比优化后的沥青混合料进行路用性能分析。结果表明:粉煤灰和玄武岩纤维沥青混合料的最优配合比为粉煤灰掺量 6.92%,玄武岩纤维掺量 0.39%,油石比 5.30%;马歇尔稳定度各项响应指标的预测值与实测值误差最大值仅为 4.04%,表明了响应曲面分析具有较高的可靠性;相比单掺纤维沥青混合料,最优配合比混合料的稳定度提升了 7.7%,残留稳定度提升了 7.52%,最大弯拉应变提升了 13.47%,高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性等指标均有较大提升,2 种材料对 AC-13C 级配的改性沥青混合料的路用性能有显著的复合改性效果。优化得到的混合料配合比可为粉煤灰和玄武岩纤维在路面工程使用提供依据。

关键词: 道路工程;玄武岩纤维;粉煤灰;改性沥青;响应曲面法;路用性能

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2025)07-0533-08

引用格式:俞烨炜,王修山,李震南,等. 粉煤灰/玄武岩纤维改性沥青混合料配合比优化研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学),2025,53(4):533-540.

Reference Format: YU Yewei, WANG Xiushan, LI Zhennan, et al. Research on the optimization of fly ash/basalt fiber-modified asphalt mixture ratio[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2025, 53(4): 533-540.

Research on the optimization of fly ash/basalt fiber-modified asphalt mixture ratio

YU Yewei¹, WANG Xiushan², LI Zhenman¹, LIU Qi¹, HU Yiqi¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Construction Equipment, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China)

Abstract: To optimize the mix ratio of fly ash and basalt fiber asphalt mixture, the effect of fly ash and basalt fiber on the road performance of asphalt mixture was analyzed. The basalt fiber content, fly ash content and asphalt-stone ratio were taken as influencing factors, and the optimal content of the mixture was obtained through response surface analysis. Then, the road performance of the asphalt mixture with optimized mix ratio was analyzed through Marshall test, immersed Marshall test and low-temperature beam bending test. The results show that the optimal mix ratio of fly ash and basalt fiber asphalt mixture is 6.92% fly ash, 0.39% basalt fiber, and 5.30% asphalt-rock ratio; the maximum error between the predicted value and the measured value of each response index of Marshall stability is only 4.04%, which shows that the response surface analysis has high reliability; compared with the single fiber asphalt mixture, the stability of the optimal mix ratio mixture is increased by 7.7%, the residual stability is increased by 7.52%, and the maximum bending tensile strain is increased by 13.47%. Furthermore, the high temperature stability, low temperature crack resistance, water stability and other indicators are

收稿日期: 2025-02-07 网络出版日期: 2025-04-01

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LGF22E080016)

作者简介: 俞烨炜(2000—),男,杭州人,硕士研究生,主要从事道路材料方面的研究。

通信作者: 王修山, E-mail: wxs77777@163.com

greatly improved. The two materials have a significant composite modification effect on the road performance of AC-13C graded modified asphalt mixture. The optimized mix ratio results in this paper can provide a basis for the use of fly ash and basalt fiber in pavement engineering.

Key words: road engineering; basalt fiber; fly ash; modified asphalt; response surface method; pavement performance

0 引 言

沥青混合料是由石油沥青和矿物结合料在一定温度下拌合而成的工程材料,在高等级路面工程中广泛使用^[1]。目前,交通运输领域的新材料研究都面向于减碳和低环境影响需求^[2],将固体废物如废轮胎等^[3]用于道路材料已经成为一种新的研究趋势,研究此类材料在沥青混合料中的最优配合比和路用性能提升效果进行回收利用符合绿色环保需求。

粉煤灰(Fly ash,FA)是火力发电厂燃煤过程中产生的一种粉末状铝硅酸盐固体废物^[4]。火力发电的需求致使粉煤灰产出量大,其主要成分为铝硅酸盐,有较高的化学活性,因此在废物利用方面具有广阔的应用前景;另外,它作为一种活性材料,在地基加固领域已经发挥出巨大作用^[5]。在道路工程领域,粉煤灰对沥青混合料具有一定的改良效果,但存在缺陷,应用仍不广泛:张艳等^[6]将高钙粉煤灰作为矿物填料掺入沥青混合料中,发现粉煤灰能够提高混合料的动稳定度,但会降低劈裂强度;Li 等^[7]将粉煤灰和煤直接液化残渣作为填料代替石灰石矿粉,提高了沥青的黏度、抗车辙能力、弹性和抗永久变形能力,并降低了温度敏感性。综上所述,粉煤灰掺入沥青混合料可以提升动稳定度、弹性等性能,表明其有广阔的应用前景,但会降低沥青混合料劈裂强度等低温抗裂性能,因此通过其他材料混掺改性粉煤灰沥青混合料对此问题的改善研究亟待进行。

玄武岩纤维(Basalt fiber,BF)是一种由天然玄武岩拉制的无机高性能纤维材料,能够通过吸附加筋作用有效提升沥青混合料的低温抗裂性能,已被广泛应用于沥青道路领域^[8]。但玄武岩纤维表面光滑,粗糙度小,吸油性较其他纤维差,用于普通沥青混合料时吸附稳定作用效果欠佳且不经济^[9]。目前,通过玄武岩纤维与其他材料混掺来改良沥青混合料的性能是沥青混合料性能研究的新趋势:马峰等^[10]通过玄武岩纤维与纳米 TiO₂/ZnO 对沥青进行复合改性,发现混合料的水稳定性和高温性能相

比单掺玄武岩纤维有较大提升;朱春风等^[11]通过硅藻土和玄武岩纤维对沥青进行复合改性,发现沥青混合料的路用性能都有明显提高。

粉煤灰能够提升沥青混合料的高温性能,但加入过量会降低沥青混合料的劈裂强度,而玄武岩纤维能够弥补这一缺点,提高低温抗裂性能,同时粉煤灰的吸附能力能够弥补玄武岩纤维相比于其他纤维吸油性不足的问题。因此,将两者混掺入沥青混合料有望改善混合料的路用性能。目前,相关研究采用纤维与粉煤灰改善沥青混合料的性能,但是只考虑了单一材料的作用,没有对两种材料进行复合改性时的交互影响进行分析,并且忽略了粉煤灰和玄武岩纤维对最优油石比的影响^[12-13]。

本文采用响应曲面法,把玄武岩纤维掺量、粉煤灰掺量和油石比作为影响因素,空隙率、矿料间隙率、有效沥青饱和度、稳定性和流值作为响应指标,以稳定度这一最重要响应指标为例,进行响应曲面分析,通过对 5 个响应指标设置期望值,进行最优掺量预测,优化其配合比;在此基础上,对最优配合比下的沥青混合料进行路用性能试验,通过马歇尔试验、浸水马歇尔试验和低温小梁弯曲试验评价混合料的高温稳定性、水稳定性和低温抗裂性,分析其路用性能提升效果,为玄武岩纤维和粉煤灰在路面工程的使用提供依据。

1 原材料与级配组成

1.1 SBS 改性沥青

SBS 改性沥青目前凭其优异的路用性能而广泛应用于高等级路面^[14],因此本文采用的沥青为由茂名市某公司提供的 SBS 改性沥青。根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)对该沥青的各项指标进行试验检测,结果如表 1。

1.2 集 料

本文采用的粗集料为石灰岩,选用粒径大小为 3~5、5~10 mm 和 10~15 mm 的 3 种矿料,所用的细集料为粒径大小为 0~3 mm 的石灰岩石屑。根据《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)对其性能参数进行测定,均满足要求。

表 1 试验用 SBS 改性沥青主要性能参数

指标	规范要求	实测值	试验方法
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	50.0~70.0	51.4	T0604-2011
延度(5 ℃)/cm	≥25.0	26.3	T0605-2011
软化点/℃	≥65	78	T0606-2011
密度(25 ℃)/(g•cm ⁻³)		1.019	T0603-2011
相对密度		1.022	T0603-2011

1.3 粉煤灰

(JTG E42—2005)测定粉煤灰性能参数,结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,粉煤灰性能符合规范要求。

本文所采用的粉煤灰为由河南省郑州市某公司生产的一级粉煤灰。根据《公路工程集料试验规程》

表 2 试验用粉煤灰主要性能参数

检测项目	标准值	实测值
表观相对密度/(g•cm ⁻³)	≥2.50	2.55
粒度范围<0.6 mm 颗粒所占质量百分比/%	100.0	100.0
粒度范围<0.15 mm 颗粒所占质量百分比/%	90.0~100.0	98.1
粒度范围<0.075 mm 颗粒所占质量百分比/%	75.0~100.0	84.6
含水率/%	≤1.0	0.3
外观	无团块结粒	无团块结粒
亲水指数	<1.0	0.6

1.4 玄武岩纤维

有限公司提供的 6 mm 短切玄武岩纤维,纤维的主要性能参数如表 3 所示。

本文采用的玄武岩纤维是由河北喜速工程橡胶

表 3 试验用玄武岩纤维主要性能参数

项目	材质	长度/mm	密度/(g•cm ⁻³)	直径/μm	抗拉强度/MPa
实测值	玄武岩	6	2.64	13~17	2306

1.5 混合料级配组成

的粉煤灰矿料级配范围如表 4 所示。根据结果绘制合成级配曲线,如图 1 所示。由于粉煤灰颗粒细小,会使混合料中小粒径的矿料占比增加,试验级配曲线会更加接近级配下限。

根据《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004),本文最终确定采用 AC-13C 为试验级配,对经过筛分的矿料进行反复试配,3 种不同掺量

表 4 AC-13C 与试验用不同粉煤灰掺量合成矿料级配表

筛孔尺寸/mm	级配上限/%	级配下限/%	级配中值/%	3%粉煤灰级配/%	6%粉煤灰级配/%	9%粉煤灰级配/%
16.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
13.200	100.0	90.0	95.0	96.6	96.6	96.6
9.500	85.0	68.0	76.5	80.2	80.8	81.3
4.750	68.0	38.0	53.0	49.9	51.4	52.7
2.360	50.0	24.0	37.0	24.2	26.4	28.5
1.180	38.0	15.0	26.5	17.8	20.2	22.5
0.600	28.0	10.0	19.0	13.6	16.1	18.5
0.300	20.0	7.0	13.5	10.1	12.7	15.1
0.150	15.0	5.0	10.0	8.4	11.0	13.5
0.075	8.0	4.0	6.0	4.6	6.5	7.3

2 最优配合比试验

2.1 试验设计

相比于传统正交试验设计,响应曲面法是一种能够证明因素之间的交互作用的优化随机过程的统

计研究方法,试验数量少,同质方程精度高。本文采用 Design-Expert 的 Box-Behnkn Design(BBD)模块,选用 3 个因素,分别为玄武岩纤维掺量(A)、粉煤灰掺量(B)、油石比(C),进行三因素三水平复合设计,以马歇尔试件的空隙率(VV)、矿料间隙率(VMA)、

有效沥青饱和度(VFA)、稳定度(MS)、流值(FL)作为响应值,共进行 17 组试验,包括 5 组中心点平行试验。根据相关文献确定玄武岩纤维单掺最佳掺量在 0.4%左右^[15-17],粉煤灰单掺最佳掺量在 3%~6%^[18-21],因此确定各影响因素水平如表 5 所示。

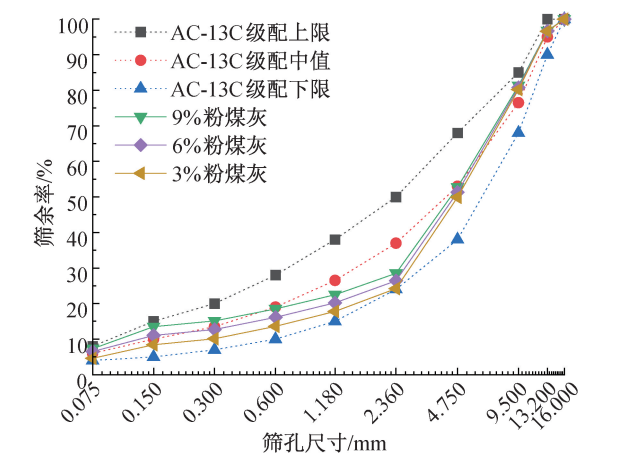


图 1 AC-13C 与试验用不同粉煤灰掺量合成矿料级配曲线

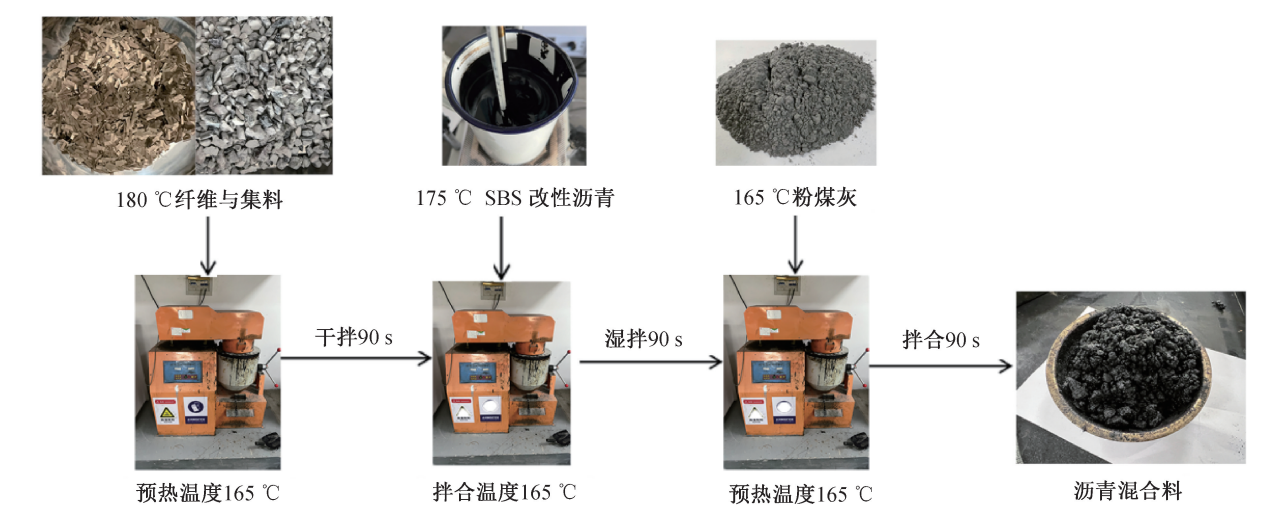


图 2 粉煤灰和玄武岩纤维沥青混合料拌合流程图

沥青混合料制备完成后,根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测量稳定度等响应值。

2.3 试验结果处理

试验共得到 17 组试验数据,包括不同影响因素下,空隙率、矿料间隙率、有效沥青饱和度、稳定度、流值的试验数据如表 6。

马歇尔试验中稳定度能够反映沥青混合料的承载力,5 个响应值中可靠度最高,因此以稳定度为例对数据进行分析,表 7 为 Design Expert 软件进行的拟合方程方差检验分析结果。

稳定度 S 的实际方程如式(1)所示:

表 5 响应曲面法试验的影响因素与水平

影响因素	水平		
	−1	0	1
A:玄武岩纤维掺量/%	0.20	0.35	0.50
B:粉煤灰掺量/%	3.00	6.00	9.00
C:油石比/%	4.50	5.00	5.50

2.2 试验方法

粉煤灰在沥青混合料中吸油性较强,玄武岩纤维的加入使这一现象更加明显;玄武岩纤维需要在加入沥青前拌合,否则沥青的黏性会阻止其分散,导致混合料中各材料分布不均。经过试拌,最终确定沥青混合料的拌和流程为:先在烘箱中将纤维和集料加热至 180 °C,然后在预热温度为 165 °C 的搅拌机中干拌 90 s,使纤维在其中分散均匀;再加入 175 °C 的 SBS 改性沥青湿拌 90 s;最后放入 165 °C 的粉煤灰拌合 90 s,得到沥青混合料。粉煤灰和玄武岩纤维沥青混合料拌合流程如图 2 所示。

$$S = -32.88497 + 31.73222X + 0.393167Y + 14.485Z + 0.05XY - 1.5XZ - 0.018333YZ - 33.85556X^2 - 0.026306Y^2 - 1.207Z^2 \tag{1}$$

编码方程如式(2)所示:

$$S = 14.67 + 0.1250X + 0.0100Y + 0.8900Z + 0.0225XY - 0.1125XZ - 0.0275YZ - 0.7618X^2 - 0.2367Y^2 - 0.3017Z^2 \tag{2}$$

其中: X 表示玄武岩纤维掺量,%; Y 表示粉煤灰掺量,%; Z 表示油石比,%。

统计学中认为事件概率 P 会受不可控因素影

响,不可控因素会使得结果产生误差。本文先假定方差检验结果不存在显著性差异,当 $P<0.05$ 时,试验结果存在统计学差异,此项为显著;当 $P>0.05$ 时,符合假定条件,此项为不显著^[22]。稳定度检验结果 X 、 Z 、 X^2 、 Y^2 、 Z^2 均为显著项,且拟合度 R^2 为98.46%,失拟项为不显著项,模型 F 值显示模型为

显著的,表明模型能够反映出实际结果,具有较好模拟效果。

去掉不显著项后的稳定度编码方程如式(3)所示:

$$S=14.67+0.1250X+0.8900Z-0.7618X^2-0.2367Y^2-0.3017Z^2$$

(3)

表 6 响应曲面设计试验结果数据

试验组别	影响因素			响应指标				
	A:玄武岩纤维掺量/%	B:粉煤灰掺量/%	C:油石比/%	VV/%	VMA/%	VFA/%	MS/kN	FL/mm
1	0.20	3.00	5.00	4.5	13.39	66.36	13.59	4.66
2	0.50	3.00	5.00	4.3	13.31	62.38	13.68	4.49
3	0.20	9.00	5.00	4.4	13.18	66.86	13.61	4.39
4	0.50	9.00	5.00	4.2	13.27	62.88	13.79	4.20
5	0.20	6.00	4.50	5.7	13.33	56.00	12.32	3.48
6	0.50	6.00	4.50	5.5	13.42	52.57	12.91	3.22
7	0.20	6.00	5.50	3.6	13.32	74.66	14.52	5.42
8	0.50	6.00	5.50	3.2	13.26	71.44	14.66	5.05
9	0.35	3.00	4.50	5.7	13.42	54.03	13.32	3.53
10	0.35	9.00	4.50	5.6	13.37	55.23	13.35	3.28
11	0.35	3.00	5.50	3.4	13.36	72.65	14.96	5.80
12	0.35	9.00	5.50	3.3	13.27	73.40	14.88	5.21
13	0.35	6.00	5.00	4.4	13.29	64.93	14.67	4.32
14	0.35	6.00	5.00	4.2	13.32	64.35	14.52	4.19
15	0.35	6.00	5.00	4.6	13.36	64.73	14.82	4.25
16	0.35	6.00	5.00	4.3	13.29	65.85	14.63	4.13
17	0.35	6.00	5.00	4.1	13.24	63.63	14.69	4.22

表 7 拟合方程方差检验分析结果

项目	平方和	自由度	均方差	F	P	显著性
模型	9.8100	9	1.0900	49.8000	<0.0001	显著
X	0.1250	1	0.1250	5.7000	0.0483	显著
Y	0.0008	1	0.0008	0.0365	0.8539	不显著
Z	6.3400	1	6.3400	289.0300	<0.0001	显著
XY	0.0020	1	0.0020	0.0924	0.7700	不显著
XZ	0.0506	1	0.0506	2.3100	0.1724	不显著
YZ	0.0030	1	0.0030	0.1380	0.7213	不显著
X^2	2.4400	1	2.4400	111.4400	<0.0001	显著
Y^2	0.2340	1	0.2340	10.7600	0.0135	显著
Z^2	0.3808	1	0.3808	17.4900	0.0041	显著
残值	0.1109	7	0.0158			
失拟	0.1065	3	0.0355	3.0300	0.1562	不显著
纯误差	0.0043	4	0.0011			
总离差	9.9200	16				
R^2				0.9846		

2.4 各影响因子交互分析

通过 Design-Expert 的 BBD 模块得到稳定度响应指标的最终二阶回归方程式,根据该方程式分别导出油石比为 5.00%、粉煤灰掺量为 6.00%、玄武

岩纤维掺量为 0.35%时曲面图和等值线图,结果如图 3—图 5 所示。

图 3 表明,当油石比为 5.00%时,随着玄武岩纤维掺量和粉煤灰掺量增加,稳定度均呈现先增大

后减小的发展趋势。因此,在掺量设置范围内存在玄武岩纤维和粉煤灰的最优掺量,可获得混合料的最高稳定度。

图 4 表明,当粉煤灰掺量为 6.00%时,随着玄武岩纤维掺量增加,稳定度呈现先增大后减小的发展趋势。这是因为在一定范围内玄武岩纤维的加筋作用会提升混合料的强度,而过多的纤维会发生团聚作用。随着油石比的增大,稳定度在一定范围内有较大的增长幅度,之后趋于稳定。因此,在此范围内存在玄武岩纤维最优掺量和最优油石比,能够得到低油石比下较高的混合料稳定度。

图 5 表明,当玄武岩纤维掺量为 0.35%时,随

着粉煤灰掺量增加,稳定度呈现先增大后减小的发展趋势。这是因为在一定范围内粉煤灰颗粒可以填充混合料矿料中的间隙,而过多的粉煤灰因其比表面积大、吸油性强的特性,易与沥青成团。随着油石比的增大,稳定度在一定范围内有较大的增长幅度,之后趋于稳定。因此,在此范围内存在粉煤灰最优掺量和最优油石比,能够得到低油石比下较高的混合料稳定度。

综上所述,玄武岩纤维掺量和粉煤灰掺量均会对混合料稳定度产生影响,且存在一组最优配合比,能够获得较高的混合料稳定度,又不使掺量过大,造成成本过高。

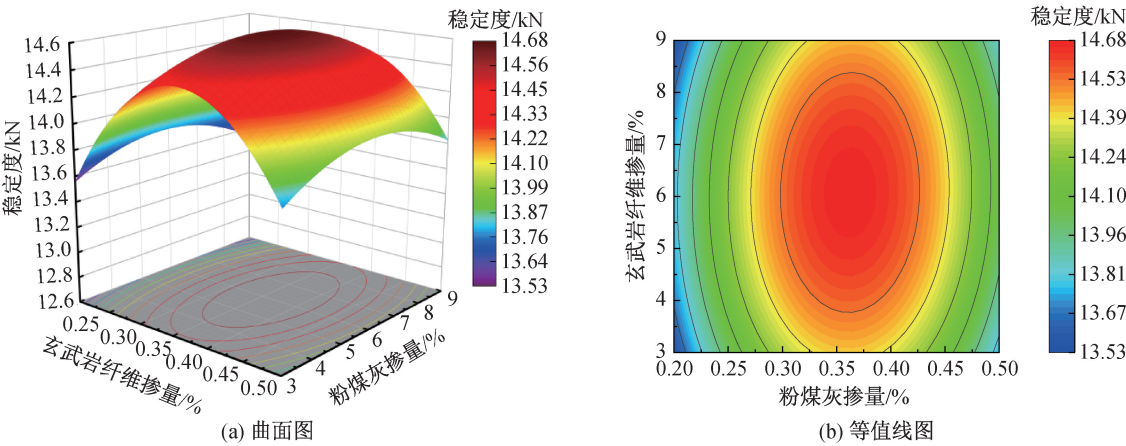


图 3 油石比为 5.00%的粉煤灰掺量和玄武岩纤维掺量交互影响响应曲面图与等值线

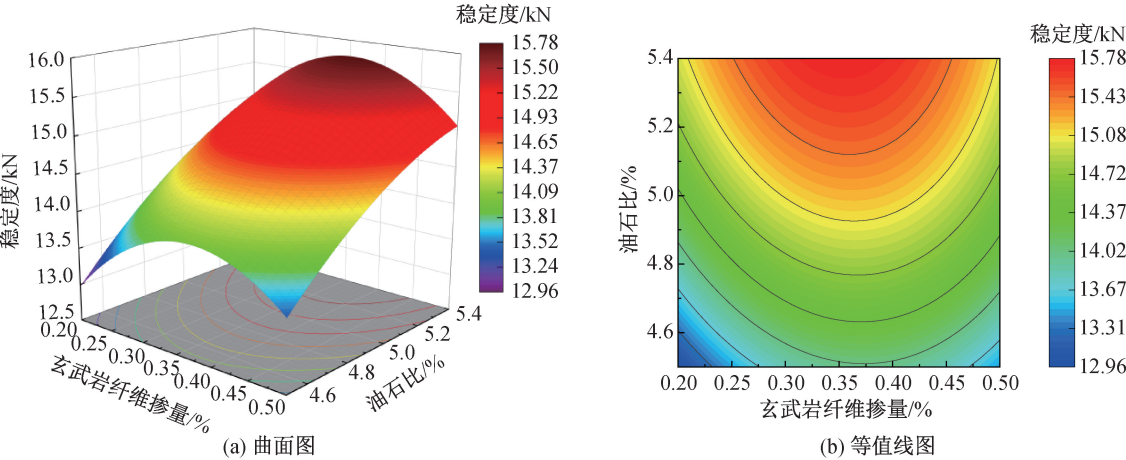


图 4 粉煤灰掺量为 6.00%的玄武岩纤维掺量和油石比交互影响响应曲面图与等值线

2.5 最优配合比获取

将 VV 期望值设置为 3.5%~4.5%,VMA 期望值设置为 13.2%~13.42%,VFA 期望值设置为 60%~70%,MS 期望值设置为最大,FL 期望值设置为 3.3~5.0 mm,进行拟合方程回归点分析,得到混合料最优配合比:粉煤灰掺量 6.92%,玄武岩

纤维掺量 0.39%,油石比 5.30%。

以得出的混合料最优配合比再制备马歇尔试验试件,将测得的响应指标与预测值进行对照,结果如表 8 所示。由表 8 可知,得到的各项响应指标的预测值与实测值的误差均在 5%之内,表明该方法得到的最优配合比有较大可靠性。

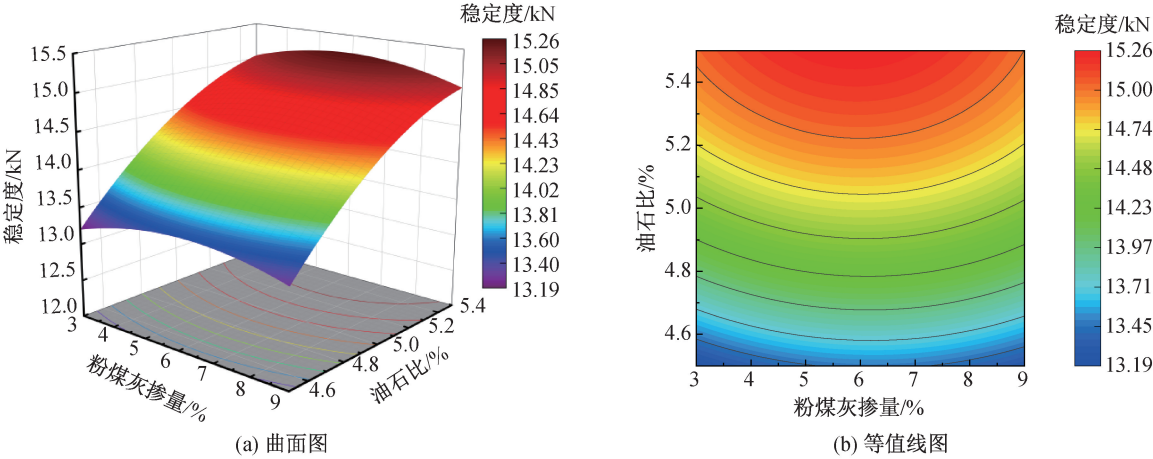


图 5 玄武岩纤维掺量为 0.35% 的粉煤灰掺量和油石比交互影响响应曲面图与等值线

表 8 响应曲面法预测数据与实测数据

响应指标	VV/%	VMA/%	VFA/%	MS/kN	FL/mm
预测值	3.70	13.27	69.44	15.04	4.75
实测值	3.68	13.74	68.33	15.32	4.95
误差/%	0.54	3.42	1.62	1.83	4.04

3 路用性能试验分析

3.1 马歇尔试验和浸水马歇尔试验

按照混合料最优配合比,分别设置 2 组对照组进行马歇尔和浸水马歇尔试验,其中:1 组为只掺入玄武岩纤维的混合料,1 组为粉煤灰和玄武岩纤维都不掺的普通混合料。

马歇尔试验结果如图 6 中稳定度所示,结果表明:相比普通混合料的试验组,单掺玄武岩纤维的稳定度提升了 7.7%,流值下降了 5.3%;相比玄武岩纤维的试验组,复掺玄武岩纤维和粉煤灰的稳定度提升了 12.9%,流值下降了 22.9%。这表明粉煤灰能够进一步提升沥青混合料的高温稳定性,主要原因是粉煤灰具有比表面积大的特性,能够吸附更多沥青,提升了混合料的稳定度。

浸水马歇尔试验结果如图 6 中浸水稳定度和残留稳定度所示,结果表明:掺入两种材料的混合料相比于都不掺的普通沥青混合料,残留稳定度提升了 9.12%,表明玄武岩纤维的加入能够提升混合料水稳定性。这是因为纤维既有机咬合力,又增大了集料颗粒间摩擦力;而粉煤灰的加入进一步增大了摩擦系数,摩擦力能够得到进一步提升。掺入两种材料的混合料残留稳定度比普通沥青混合料提升了 17.33%,比单掺玄武岩纤维的混合料提升了 7.52%,复合改性的作用更显著。这是因为粉煤灰

的加入,既填充了空隙使得混合料结构更加密实,减少了水的侵入,又能够吸收水分,降低水对混合料结构的影响。

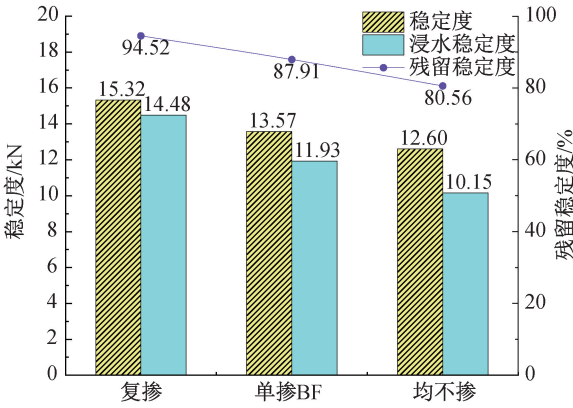


图 6 马歇尔试验与浸水马歇尔试验结果柱状图

3.2 低温小梁弯曲试验

低温小梁弯曲试验结果如表 9 所示,从表中可以看出:相比普通沥青混合料,单掺玄武岩纤维的沥青混合料的最大弯拉应变提升了 19.67%,劲度模量下降了 5.18%;相比单掺玄武岩纤维沥青混合料,复掺玄武岩纤维和粉煤灰的混合料的最大弯拉应变提升了 13.47%,劲度模量下降了 6.16%;相比均不掺的普通沥青混合料,复掺玄武岩纤维和粉煤灰的混合料的最大弯拉应变提升了 35.79%,劲度模量下降了 11.03%。这表明粉煤灰和玄武岩纤维复掺能够提升沥青混合料的低温抗裂性。粉煤灰能够进一步提升沥青混合料的低温抗裂性能,是因为粉煤灰能够增加内部集料颗粒的相对比表面积,使产生的结构沥青黏膜更多;而且粉煤灰的加入能够阻止玄武岩纤维在沥青混合料中团聚,进而促使其更好地分散于混合料中。

表 9 沥青混合料低温小梁弯曲试验结果数据

组别	抗弯拉强度/MPa	弯拉应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa
复掺	12.10	3631	3228
单掺玄武岩纤维	11.01	3200	3440
均不掺	10.01	2674	3628

4 结 论

本文考虑了粉煤灰和玄武岩纤维对油石比的影响,采用响应曲面法,将油石比与玄武岩纤维掺量、粉煤灰掺量作为影响因素,得到了混合料最优配合比,在此基础上对最优配合比下的沥青混合料进行路用性能试验,分析性能提升效果,主要结论如下:

a) AC-13C 级配下沥青混合料最优配合比为:粉煤灰掺量为 6.92%,玄武岩纤维掺量为 0.39%,油石比为 5.30%。马歇尔试验结果显示各项响应指标的预测值与实测值的误差最高仅 4.04%。

b) 相比于单掺玄武岩纤维混合料,最优配合比下的沥青混合料的稳定度提升了 7.7%,残留稳定度提升了 7.52%,最大弯拉应变提升了 13.47%;相比于不掺 2 种外加剂的普通混合料,最优配合比下的沥青混合料的稳定度提升了 12.9%,残留稳定度提升了 17.33%,最大弯拉应变提升了 35.79%,劲度模量下降了 11.03%。这表明在 AC-13C 级配下的改性沥青混合料中,粉煤灰和玄武岩纤维的加入能够相互作用,解决只掺入单一材料所存在的性能下降问题;混合料的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性 3 种路用性能均能得到提高,表明这两种材料对路用性能有显著的复合改性效果。

本文所优化得到的最优配合比相比现有研究,既考虑了玄武岩纤维和粉煤灰对最优油石比的影响,又解决了单掺粉煤灰的沥青混合料低温抗裂性下降的问题,得到的结论可以为玄武岩纤维和粉煤灰用于路面工程提供依据。

参考文献:

[1] 王海成,金娇,刘帅,等. 环境友好型绿色道路研究进展与展望[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2137-2169.

[2] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2024[J]. 中国公路学报, 2024, 37(3): 1-81.

[3] 徐光霁,范剑伟,马涛,等. 高掺量废胎胶粉改性沥青性能研究[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 5-12.

[4] 于峥,王琼,张振群. 掺烧污泥型粉煤灰的物理化学性质及其

重金属吸附性能[J]. 化工环保, 2024, 44(2): 242-248.

[5] 杨望星,陈柯宇,俞炜炜,等. 粉煤灰基地聚合物替代水泥加固软土的试验研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 433-440.

[6] 张艳,刘斌. 粉煤灰作填料的沥青混合料试验及应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(2): 14-17.

[7] Li Z, Zhang X, Liu F, et al. Effect of replacement of limestone mineral powder with fly ash and direct coal liquefaction residue on the rheological properties of asphalt mastic[J]. Construction and Building Materials, 2024, 412: 134803.

[8] 李俊峰,李文凯,李正强,等. 玄武岩纤维排水高黏沥青混合料性能研究[J]. 公路交通科技, 2022, 39(9): 1-8.

[9] 陈飞,张林艳,李先延,等. 天然纤维沥青混合料研究与应用进展[J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1472-1479.

[10] 马峰,安强,傅珍,等. 纳米 ZnO/TiO₂ 对玄武岩纤维改性沥青性能影响[J]. 功能材料, 2023, 54(8): 8192-8198.

[11] 朱春风,程永春,梁春雨,等. 硅藻土-玄武岩纤维复合改性沥青混合料路用性能试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(1): 165-173.

[12] 汪鑫. 纤维粉煤灰沥青混合料最优配比试验研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022: 26-35.

[13] 崔善成,吴金荣,宋风宁,等. 粉煤灰-聚酯纤维沥青混合料低温性能研究[J]. 建井技术, 2020, 41(4): 28-34.

[14] 田耀刚,卯爱军,阎宝宝,等. 基于 SBS 支链活性修复的老化沥青再生性能研究[J]. 功能材料, 2023, 54(12): 12113-12118.

[15] 刘炳华,金彦鑫,陈望平,等. 玄武岩纤维在重载 SBS 沥青玛蹄脂碎石混合料路面中的应用[J]. 公路, 2022, 67(4): 8-14.

[16] Huang Q, Kang X, Chen P, et al. Characterization of viscoelastic behavior of basalt fiber asphalt mixtures based on discrete and continuous spectrum models. [J]. PloS one, 2024, 19(2): e0296087.

[17] Long A X, Sun X J, Zhang G L, et al. Study on fracture performance and failure mechanism of hydraulic basalt fiber asphalt concrete by considering temperature effect [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 125: 103895.

[18] 张雅红. 粉煤灰沥青混合料的最佳掺量试验[J]. 交通世界, 2023(32): 53-55.

[19] 吴金荣,李飞,宋风宁,等. 粉煤灰/聚酯纤维沥青混合料马歇尔试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(4): 1343-1350.

[20] Ming N C, Ing N L S, Masri K A, et al. Performance of asphaltic concrete incorporating fly ash under low temperature [J]. Key Engineering Materials, 2022, 912: 153-169.

[21] Dahim M, Abuaddous M, Al-Mattarneh H, et al. Enhancement of road pavement material using conventional and nano-crude oil fly ash [J]. Applied Nanoscience, 2021, 11(10): 2517-2524.

[22] 刘朝晖,朱国虎,柳力,等. 玄武岩纤维与高模量外掺剂复合增强沥青混合料性能[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 2147-2155.