

王伟,杨晚生,甘新众,等.干法 TPCB 改性沥青 AC-13 混合料制备参数[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):39-48. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.006

WANG W, YANG W S, GAN X Z, et al. On Preparation Parameters of Dry TPCB Modified Asphalt AC-13 Mixture[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 37(4): 39-48. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.006

干法 TPCB 改性沥青 AC-13 混合料制备参数

王伟^{1,4*}, 杨晚生², 甘新众³, 刘群艳³, 王凯⁴

(1. 湖南交通职业技术学院 路桥工程学院, 湖南 长沙 410132; 2. 江西宜春市政交通建设有限公司, 江西 宜春 336000;
3. 江西省宜春市公路事业发展中心, 江西 宜春 336000; 4. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要:为确定干法 TPCB 改性沥青 AC-13 混合料的制备参数,研究 TPCB 掺量、拌合时间、拌合温度和矿料加热温度对动稳定性和冻融劈裂强度比的影响规律,通过直观分析、方差分析和多因素相互作用分析方法,确定干法 TPCB 改性沥青混合料制备参数,检验干法 TPCB 改性沥青混合料室内性能.研究表明:TPCB 掺量对动稳定性和冻融劈裂强度的影响最大;室内制备程序将加热温度为 170~180 °C 的粗细集料和 10%TPCB 置于拌合机干拌 15 s,然后加入 160 °C 基质沥青湿拌 90 s,最后加入加热的矿粉拌和 90 s,拌合温度为 170~180 °C;干法 TPCB 改性沥青 AC-13 混合料具有良好的高温性能与水稳定性能.

关键词:道路工程;TPCB 改性沥青混合料;干法;多因素相互作用;制备参数

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0039-10

On Preparation Parameters of Dry TPCB Modified Asphalt AC-13 Mixture

WANG Wei^{1,4}, YANG Wansheng², GAN Xinzong³, LIU Qunyan³, WANG Kai⁴

(1. College of Road and Bridge Engineering, Hunan Communication Polytechnic, Changsha 410132, China;

2. Jiangxi Yichun Municipal Transportation Construction Co., Ltd., Yichun 336000, China;

3. Jiangxi Yichun Highway Development Center, Yichun 336000, China;

4. School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to determine the preparation parameters of dry TPCB modified asphalt AC-13 mixture, the effects of TPCB content, wet mixing time, mixing temperature and mineral aggregate heating temperature on dynamic stability and freeze-thaw splitting strength ratio are studied. Through visual analysis, variance analysis and multi factor interaction analysis, the preparation parameters of dry TPCB modified asphalt mixture are determined, and the indoor performance of dry TPCB modified asphalt mixture is tested. Results show that the content of TPCB has the greatest influence on dynamic stability and freeze-thaw splitting strength; In the indoor preparation procedure, we can place the coarse and fine aggregates heated at 170~180 °C and 10% TPCB in the mixer for dry mixing for 15 seconds, then add 160 °C base asphalt for wet mixing for 90 seconds, and finally add heated mineral powder for mixing for 90 seconds at 170~180 °C. The dry TPCB modified asphalt AC-13 mixture has a good and high temperature performance and water stability.

收稿日期:2022-09-22

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目资助(22B0984);江西省交通运输厅科技项目资助(2021H0019;2020H0023)

*通信作者, E-mail: wangwei@hnust.edu.cn

Keywords: road engineering; TPCB modified asphalt mixture; dry mixing method; multi factor interaction; preparation parameters

改革开放以来,我国人民的生活水平和消费能力越来越高,对汽车的需求也随之提高,废旧轮胎的数量也在逐年增加.废旧轮胎的数量大、利用率低,废旧轮胎回收利用已成为世界性难题^[1].传统的废旧轮胎处理方法不能对废旧轮胎进行完全处理,还会对生态环境造成二次伤害.目前,废旧轮胎处理的方法包括填埋、制粉和热裂解处理.近几年,国内外学者对废旧轮胎热解炭黑(Tire Pyrolysis Carbon Black, TPCB)在道路中的应用进行了大量研究.Lee^[7]和Li等^[8]的研究表明热解炭黑可以提高沥青及沥青混合料的高温性能,且热解炭黑掺量不高于10%时,热解炭黑改性沥青的贮存稳定性满足聚合物改性沥青标准的要求;田泉^[9]通过对多因素多水平试验分析,确定了热解炭黑改性沥青的室内最佳制备工艺;Li等^[10]通过动态模量试验研究,为热解炭黑运用到沥青路面设计上提供了理论依据.交通运输部于2017年颁布了交通行业标准JT/T 860.7—2017《沥青混合料改性添加剂第7部分:废旧轮胎热解炭黑》^[11].李因翔等^[12]的研究表明热解炭黑的适宜掺量为15%,当热解炭黑的掺量达到18%时,炭黑在沥青中开始团聚,难以均匀分散,软化点差值也超过规范的要求.

不难发现,TPCB改性沥青混合料有着良好的高温性能,尤其适用于高温地区使用,但目前所有研究都是基于室内湿法,也就是先将炭黑与沥青拌和,再去制备混合料.关于干法(将炭黑直接放入沥青混合料中)室内制备的相关研究较少.干法工艺是将改性剂与沥青直接投入搅拌缸现场拌制,具有环保节能、快速经济的优点^[13-14].为研究干法制备工艺,根据正交试验设计,以混合料车辙性能(高温性能)和冻融破裂强度比(抗水损害性能)为优化目标,进行直观分析、方差分析和多因素交互分析,优化确定干法TPCB改性沥青混合料的室内制备参数,为现场干法生产TPCB改性沥青混合料提供技术支撑.研究制备适用于湿热地区技术要求的干法TPCB改性沥青混合料工艺参数,为废旧轮胎热解改性沥青混合料的应用提供一种新工艺.废旧轮胎炭黑改性沥青既能实现废旧轮胎热解炭黑替代部分沥青和改善基质沥青的路用性能,又疏通了国内废旧轮胎热解炭黑的消费渠道,使自有资源得到充分利用,促进废旧轮胎的回收利用.

1 原材料与试验方法

1.1 沥青

采用70号A级道路石油基质沥青,依据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[15]检测方法,开展对沥青技术指标的检测试验,试验结果如表1所示.根据JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》^[16]对沥青进行技术性能评价.

表1 70号A级基质沥青检测结果

检测项目	单位	技术要求	试验结果	试验方法
针入度(100 g, 5 s, 25 ℃)	0.1 mm	60~80	70.5	T 0604—2011
软化点	℃	≥46	48	T 0606—2011
延度(5 cm/min, 5 ℃)	cm	≥20	39.5	T 0605—2011
延度(5 cm/min, 15 ℃)	cm	≥100	>100	T 0605—2011
密度(15 ℃)	g/cm ³	实测记录	1.023	T 0603—2011
残留物质量变化	%	±0.8	0.052	T 0609—2011
RTFOT后 残留物针入度比(25 ℃)	%	≥61	79.4	T 0604—2011
残留物延度(10 ℃)	cm	≥6	8	T 0605—2011

1.2 废旧轮胎热解炭黑

所采用的TPCB为国产废旧轮胎热解炭黑,其主要技术性能指标如表2所示.由表2可知:技术指标均满足交通运输部行业标准中的要求.

表2 TPCB 主要技术性能指标

检测项目	单位	技术要求	试验结果	试验方法
外观	-	黑色粉末状	黑色粉末状	-
灰分	%	≤18.5	14.3	GB/T—3780.10
吸碘值	mg/g	≥80	82	GB/T—3780.1
含水率	%	≤2.0	1.6	GB/T—3780.8
拉断伸长率	%	≥450	555	GB/T—3780.18
pH 值	-	≥6.0	6.55	GB/T—3780.7

1.3 集料

粗集料采用 12~18 mm, 6~12 mm, 3~6 mm 三档石灰岩, 细集料采用 0~3 mm 一档石灰岩. 按照 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》^[17] 中的检测方法对石灰岩集料进行检测并评价^[16], 检测结果如表 3 和表 4 所示.

表3 粗集料检测结果

检测项目	单位	技术要求	试验结果	试验方法	
表观相对密度	12~18 mm		2.784		
	6~12 mm	-	≥2.60	2.769	T 0304—2005
	3~6 mm		2.753		
吸水率	12~18 mm		0.5		
	6~12 mm	%	≤2.0	0.6	T 0304—2005
	3~6 mm		0.7		
洛杉矶磨耗损失	%	≤28	17.5	T 0317—2005	
针片状颗粒含量	12~18 mm	%	≤12	9.5	T 0312—2005
	6~12 mm		9.1		
<0.075 mm 颗粒含量	12~18 mm	%	≤1	0.4	T 0302—2005
	6~12 mm		0.6		
石料压碎值	%	≤24	15.7	T 0316—2005	
石料磨光值	PSV	≥42	49	T 0321—2005	

表4 细集料检测结果

检测项目	单位	技术要求	试验结果	试验方法
表观相对密度	-	≥2.60	2.744	T 0328—2005
砂当量	%	≥60	68	T 0334—2005
棱角性(流动时间)	s	≥30	38	T 0345—2005

1.4 填料

本文所用的填料为矿粉, 依据 JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》中的检测方法对矿粉进行指标检测并评价^[16], 检测结果如表 5 所示.

表5 矿粉检测结果

检测项目	单位	技术要求	试验结果	试验方法	
表观密度	t/m ³	≥2.50	2.656	T 0352—2000	
含水量	%	≤1	0.5	T 0103—1993	
外观	-	无团粒结块	无团粒结块	-	
亲水系数	-	<1	0.75	T 0353—2000	
塑性指数	-	<4	3.6	T 0354—2000	
加热安定性	-	实测记录	无明显变色	T 0355—2000	
粒径范围	<0.6 mm	100	100		
	<0.15 mm	%	90~100	93.1	T 0351—2000
	<0.075 mm		75~100	84.0	

1.5 试验方法

采用车辙试验评价沥青混合料的高温稳定性,通过试样(300 mm×300 mm×50 mm)在60 ℃、0.7 MPa轮压、42次/min下的动稳定度来检验其抗变形能力.采用低温弯曲试验评价沥青混合料的低温抗裂性,试样(250 mm×30 mm×35 mm)放入MTS机器中,在-10 ℃下以50 mm/min的加载速率加载.采用冻融劈裂试验评价沥青混合料的水稳定性,双面分别击实50次的马歇尔试样在-18 ℃下进行冻融循环,其加载速率为50 mm/min.采用浸水马歇尔试验方法评价沥青混合料的水稳定性.试验都分别进行3组平行试验.

2 干法 TPCB 改性沥青混合料试件制备参数研究

2.1 正交试验设计

本文先按照湿法工艺制备70号基质沥青+10%TPCB改性混合料AC-13试件,马歇尔试验确定AC-13的矿料配比(质量占比):12~18 mm集料占比为30%,6~12 mm集料占比为32%,3~6 mm集料占比为2%,0~3 mm集料占比为34%,矿粉占比为2%,设计油石比为4.73%,其中TPCB掺量为沥青质量的10%,基质沥青用量为4.3%.AC-13 TPCB改性沥青混合料的矿料合成级配如表6所示.

表6 AC-13 TPCB改性沥青混合料矿料级配

筛孔/mm	16.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
设计级配上限	100	100	80	53	40	27	19	15	10	8
设计级配下限	100	90	68	42	28	15	10	7	5	4
设计级配中值	100.0	95.0	74.0	47.5	34.0	21.0	14.5	11.0	7.5	6.0
合成级配	100.0	91.0	71.9	50.2	33.3	26.3	18.2	13.9	9.4	7.9

干法制备TPCB改性沥青混合料时,保持AC-13级配和基质沥青用量与湿法设计的一致.探讨干法TPCB制备试件参数以JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料试件制作方法(击实法)T 0702—2011为基础,同时参考文献[13—14],设定基质沥青的加热温度为160 ℃,集料和TPCB的干拌时间为15 s,加入矿粉后的拌合时间为90 s.拟定干法制备流程:先将加热的粗细集料和TPCB置于拌合机干拌15 s,然后加入基质沥青湿拌1 min以上,最后加入加热的矿粉拌和90 s.本研究所选取的干法TPCB改性沥青混合料制备的4个待优化因素为热解炭黑掺量、拌合时间、拌和温度和矿料加热温度.以湿法制备水平为基准,每个因素设置3个水平.所选用的拌合时间特指加入加热到160 ℃的基质沥青后,加入矿粉前的拌合时间.所确定的干法制备参数因素及水平如表7所示.湿热地区沥青混合料应具有较高的水稳定性和高温稳定性.考虑湿热地区沥青混合料的主要技术性能要求及沥青路面的主要病害,选择动稳定度和冻融劈裂强度比为正交设计试验的优化指标.在每个指标满足我国现行沥青路面施工技术规范技术要求的最小值条件下,该指标越大表明组合越好,即2个指标都是望大特性.

表7 正交试验因素与水平

水平	热解炭黑掺量/%	拌合时间/s	拌和温度/℃	矿料加热温度/℃
1	8	60	160	170
2	10	90	170	180
3	12	120	180	190

对已确定的4因素3水平组合,参照正交试验表,确定出具有代表性的9组制备方案,如表8所示.

表8 正交试验制备组合方案

方案编号	热解炭黑掺量/%	拌合时间/s	拌和温度/℃	矿料加热温度/℃
1	8	60	160	170
2	8	90	170	180
3	8	120	180	190
4	10	60	170	190
5	10	90	180	170

续表 8

方案编号	热解炭黑掺量/%	拌合时间/s	拌合温度/℃	矿料加热温度/℃
6	10	120	160	180
7	12	60	180	180
8	12	90	160	190
9	12	120	170	170

依据上述 9 组方案制备干法 TPCB 改性沥青混合料,按照 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》规定制作马歇尔试件和车辙板进行车辙试验和冻融劈裂试验,试验结果如表 9 所示。

表 9 干法 TPCB 改性沥青 AC-13 混合料试验结果

方案编号	动稳定度 DS/(次/mm)	冻融劈裂强度比 TSR/%
1	2 654	72.4
2	2 601	74.6
3	2 793	75.1
4	3 284	77.9
5	3 416	80.2
6	3 348	79.0
7	3 217	75.8
8	2 909	76.3
9	3 090	77.0

2.2 正交试验结果分析

通过直观分析、方差分析和多因素相互作用分析 3 种方法,分析正交试验中所设定的 4 个因素对高温稳定性指标和水稳定性指标影响程度的大小关系,并确定各因素下所对应的最佳组合水平。

2.2.1 直观分析

直观分析包括均值分析和极值分析,对正交方案的试验数据进行处理,计算不同指标在各因素各水平下的均值,进而计算出不同指标各因素各水平下均值的极差。数据处理结果如表 10 所示。

表 10 各因素水平影响下的均值与极差分析结果

评价指标	影响因素	水平 1 均值	水平 2 均值	水平 3 均值	均值极差
动稳定度/(次/mm)	热解炭黑掺量/%	2 682.7	3 349.3	3 072.0	666.7
	拌合时间/s	3 051.7	2 975.3	3 077.0	101.7
	拌合温度/℃	2 970.3	2 991.7	3 142.0	171.7
	矿料加热温度/℃	3 053.3	3 055.3	2 995.3	60.0
冻融劈裂强度比 TSR/%	热解炭黑掺量/%	74.0	79.0	76.4	5.0
	拌合时间/s	75.4	77.0	77.0	1.7
	拌合温度/℃	75.9	76.5	77.0	1.1
	矿料加热温度/℃	76.4	76.5	76.5	0.1

由表 10 可知:对于动稳定度指标,热解炭黑掺量的均值极差最大,对动稳定度的影响程度最高,矿料加热温度的均值极差最低,对动稳定度的影响程度最小。各因素对其影响程度由大到小为热解炭黑掺量>拌合温度>拌合时间>矿料加热温度。沥青混合料的动稳定度越高,高温稳定性越好。本研究选取各因素下动稳定度最大的水平,各因素所选最优水平为热解炭黑掺量为 10%、拌合时间为 120 s、拌和温度为 180 ℃、矿料加热温度为 180 ℃。

对于冻融劈裂强度比 TSR 指标,热解炭黑掺量的均值极差最大,对冻融劈裂强度比 TSR 的影响程度最高,矿料加热温度的均值极差最低,对冻融劈裂强度比 TSR 的影响程度最小。各因素对其影响程度由大到小为热解炭黑掺量>拌合时间>拌合温度>矿料加热温度。沥青混合料的冻融劈裂强度比 TSR 越高,水稳定性越好。本研究选取各因素下冻融劈裂强度比 TSR 最大的水平,各因素所选最优水平为热解炭黑掺量为

10%、拌合时间为 90 s(相比拌合时间为 120 s,节省了时间与能耗,且成效一致)、拌合温度为 180 ℃、矿料加热温度为 180 ℃.

2.2.2 方差分析

在直观分析结果的基础上再进行方差分析,以观察各因素对动稳定度指标和冻融劈裂强度比指标是否有显著影响.对正交试验数据进行方差分析,得到动稳定度指标和冻融劈裂强度比指标的方差分析如表 11 和表 12 所示.

表 11 动稳定度指标方差分析

方差影响因素	平方和	自由度	方差	F	显著性	临界值
热解炭黑掺量	672 938.7	2	336 469.3	96.6	影响较大	$F_{0.05} = 19.000$
拌合时间	16 804.7	2	8 402.3	2.4	影响较小	
拌合温度	52 524.7	2	26 262.3	7.5	影响较小	
矿料加热温度	6 968.0	2	3 484.0	1.0	影响较小	

注: F 为检验两组方差之间比较结果的统计量; $F_{0.05}$ 为显著性水平为 0.05 时的临界值

表 12 冻融劈裂强度比指标方差分析

方差影响因素	平方和	自由度	方差	F	显著性	临界值
热解炭黑掺量	37.556	2	18.8	2 347.3	影响最大	$F_{0.05} = 19.000$
拌合时间	5.556	2	2.8	347.3	影响较大	
拌合温度	1.929	2	1.0	120.6	影响较大	
矿料加热温度	0.016	2	0.0	1.0	影响较小	

F 值越大,说明该因素对试验结果的影响越显著.由表 11 和表 12 可知:对于动稳定度指标,热解炭黑掺量的 F 值大于临界值,其他 3 种因素的 F 值均小于临界值.这说明热解炭黑掺量对动稳定度指标有显著性影响,其他 3 种因素的影响均不显著.根据 F 值的大小关系,4 个因素对动稳定度影响程度的大小关系为热解炭黑掺量>拌合温度>拌合时间>矿料加热温度,与直观分析方法得出的结论一致.

对于冻融劈裂强度比指标,热解炭黑掺量、拌合时间和拌合温度的 F 值均大于临界值,说明这 3 个因素对冻融劈裂强度比的影响都比较大,而矿料加热温度对冻融劈裂强度比的显著性影响较小.根据 F 值的大小关系,4 个因素对冻融劈裂强度比指标影响程度的大小关系为热解炭黑掺量>拌合时间>拌合温度>矿料加热温度,与直观分析方法得出的结论一致.

2.2.3 多因素相互作用分析

根据正交试验结果,利用 Origin 软件生成动稳定度和冻融劈裂强度比 TSR 的 3D 等高线曲面图.研究 4 个因素(热解炭黑掺量、拌合时间、拌和温度、矿料加热温度)之间的关系,综合分析各因素之间的相互作用.多因素相互作用对动稳定度影响的等高线曲面如图 1 所示,多因素相互作用对冻融劈裂强度比 TSR 影响的等高线曲面图如图 2 所示.

由图 1a~图 1c 可知:当拌合时间增加、拌和温度增加、矿料加热温度减小时,动稳定度随着热解炭黑掺量的增加先增大后减小.当热解炭黑掺量为 10%、拌合时间为 90 s、拌和温度为 180 ℃、矿料加热温度为 170 ℃时,动稳定度最大,此时高温稳定性最好.原因主要是因为热解炭黑类似于矿粉,本身材料的模量比较高,比沥青硬,与沥青混合时会提高沥青的刚度,增加沥青的黏稠度,使其针入度减小,软化点增大,黏度增加,从而提升沥青混合料的高温稳定性.但随着干法炭黑掺量的增加,导致其在拌和过程中的分散均匀性降低,这是由于炭黑是一种亚微米粉末,粉末间的静电力与范德华力较大,干法拌合难以使其在混合料中完全分散,甚至产生结团现象,炭黑主要充当填料的作用,破坏了混合料的原有级配,使得沥青混合料的动稳定度稍降低.由图 1d 可知:随着拌合时间的减小,拌和温度增加,动稳定度逐渐增大.当拌合时间为 90 s,拌和温度为 180 ℃时,动稳定度最大.由图 1e 可知:随着拌合时间的增加,矿料加热温度减小,动稳定度逐渐增大.当拌合时间为 90 s,矿料加热温度为 170 ℃时,动稳定度最大.由图 1f 可知:随着拌和温度的增加,矿料加热温度减小,动稳定度逐渐增大.当拌和温度为 180 ℃,矿料加热温度为 170 ℃时,

动稳定度最大。

根据 JT/T 860.7—2017《沥青混合料改性添加剂 第 7 部分:废旧轮胎热解炭黑》中对 TPCB 改性沥青混合料动稳定度不小于 3 000 次/mm 的技术要求,本文选择动稳定度 3 200 次/mm 作为优化指标的下限.当热解炭黑掺量为 10%~12%时,如果拌合时间为 60~120 s、拌和温度为 170~180 ℃、矿料加热温度为 170~180 ℃,混合料的动稳定度最优.当 TPCB 改性沥青混合料的动稳定度大于 3 200 次/mm 时,各因素取值范围:热解炭黑掺量为 10%~12%,拌合时间为 60~120 s,拌和温度为 170~180 ℃,矿料加热温度为 170~180 ℃.

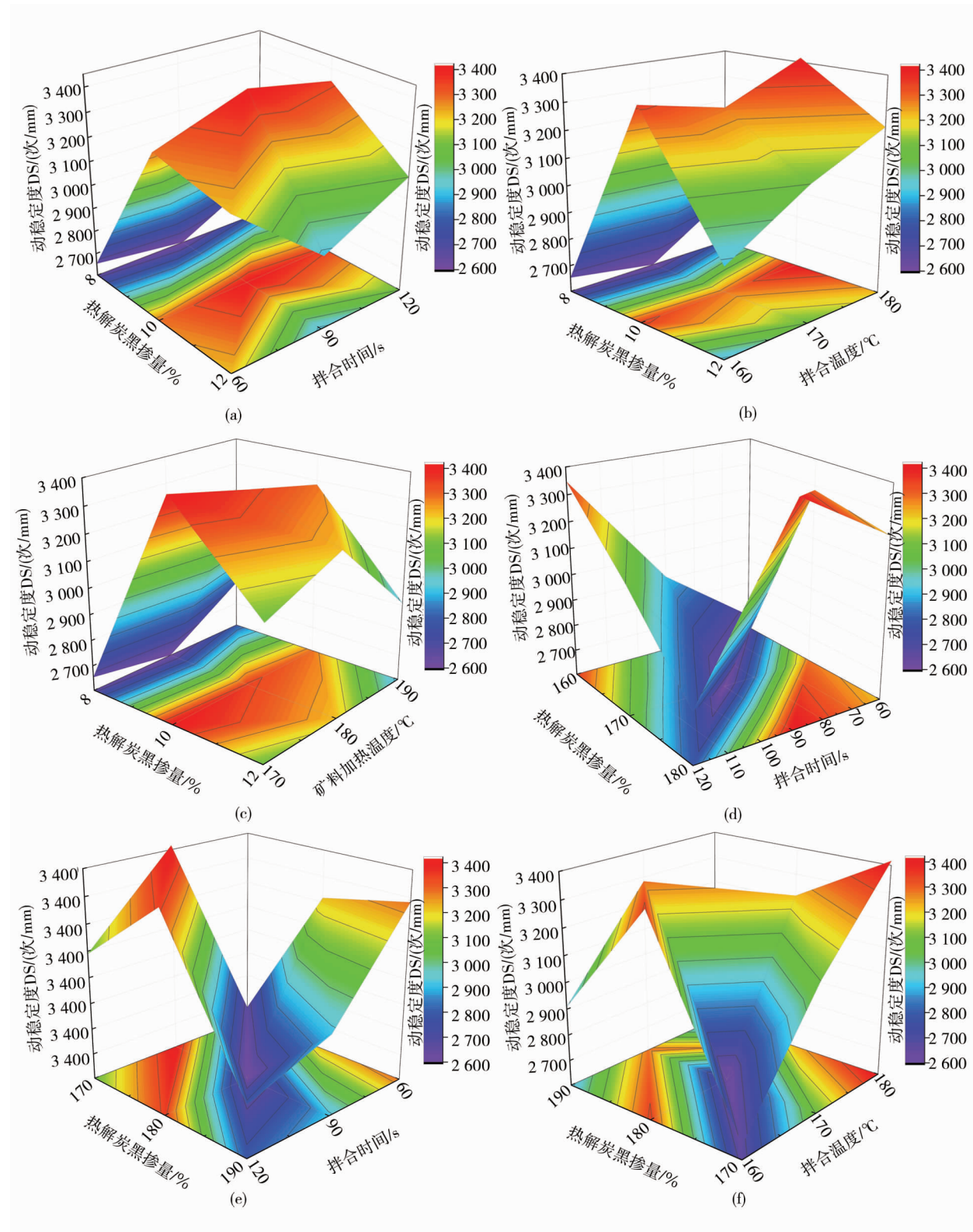


图 1 多因素相互作用对动稳定度影响的等高线曲面

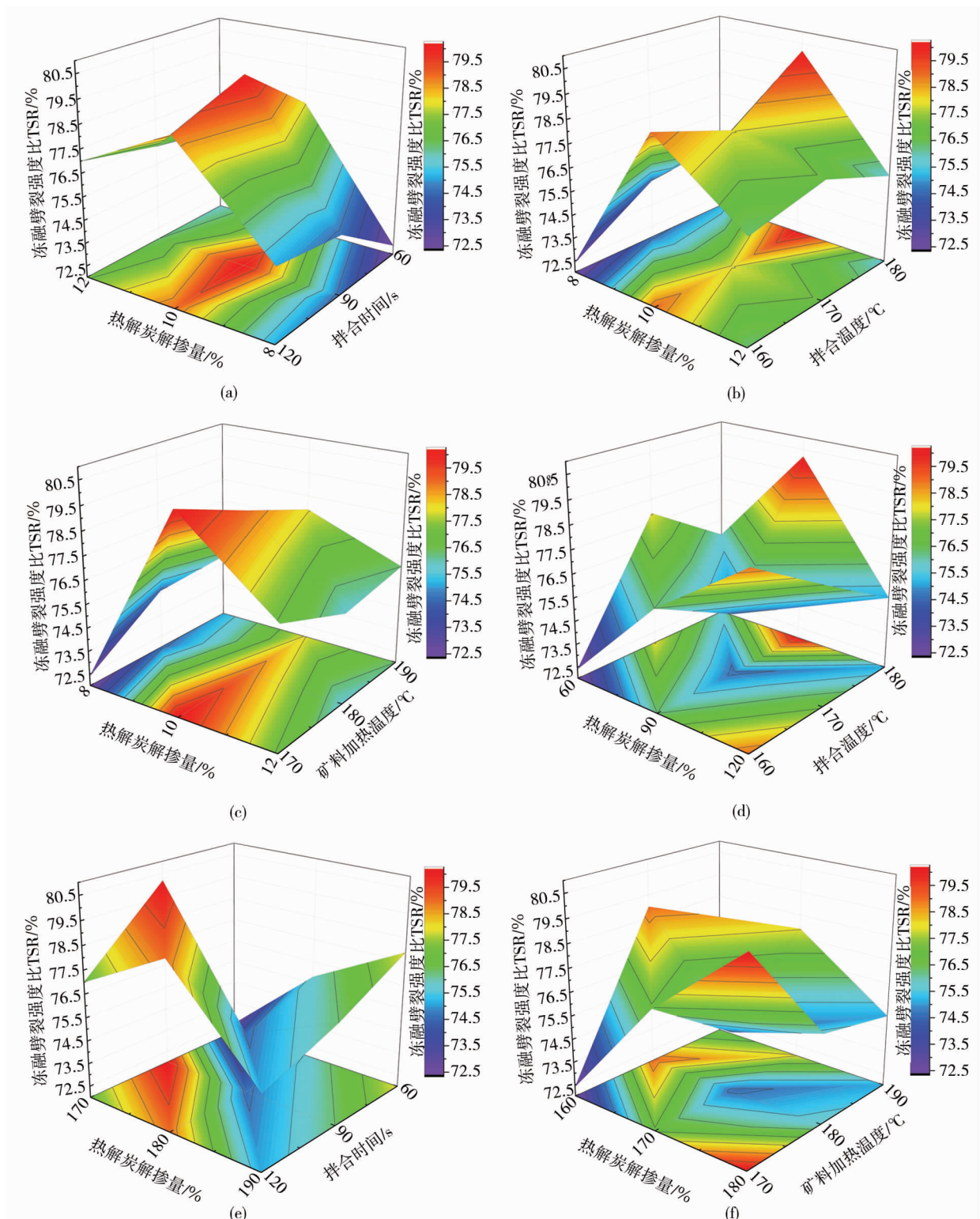


图2 多因素相互作用对冻融劈裂强度比 TSR 影响的等高线曲面

由图 2a~图 2c 可知:当热解炭黑掺量趋于 10%,拌合时间趋于 90 s,拌和温度增加、矿料加热温度减小时,冻融劈裂强度比 TSR 越高.当热解炭黑掺量为 10%、拌合时间为 90 s、拌和温度为 180 °C、矿料加热温度为 170 °C 时,冻融劈裂强度比 TSR 最大,水稳定性最好.由图 2d 可知:当拌合时间趋于 90 s、拌和温度增加时,冻融劈裂强度比 TSR 先减小后增加.当拌合时间为 90 s、拌和温度为 180 °C 时,冻融劈裂强度比 TSR 最优.由图 2e 可知:当拌合时间增加、矿料加热温度减小时,冻融劈裂强度比 TSR 先增大后减小.当拌合时间为 90 s、矿料加热温度为 170 °C 时,冻融劈裂强度比 TSR 最大.由图 2f 可知:当矿料加热温度减小、拌和温度增加时,冻融劈裂强度比 TSR 先减小后增加.当矿料加热温度为 170 °C、拌和温度为 180 °C 时,冻

融劈裂强度比 TSR 最优。

根据 JT/T 860.7—2017《沥青混合料改性添加剂第七部分:废旧轮胎热解炭黑》中对 TPCB 改性沥青混合料冻融劈裂强度比 TSR 不小于 70%的技术要求,本文选择冻融劈裂强度比 TSR 为 78%作为优化指标的下限。当热解炭黑掺量趋于 10%时,如果拌合时间为 60~120 s、拌和温度为 160~180 ℃、矿料加热温度为 170~190 ℃,混合料的冻融劈裂强度比 TSR 最优。当拌合时间趋于 90 s、拌和温度趋于 180 ℃时,混合料的冻融劈裂强度比 TSR 最大。当拌合时间为 90~120 s、矿料加热温度为 170~180 ℃时,混合料的冻融劈裂强度比 TSR 最大。当拌和温度为 170~180 ℃、矿料加热温度为 170~180 ℃时,混合料的冻融劈裂强度比 TSR 最优。当 TPCB 改性沥青混合料冻融劈裂强度比 TSR 大于 78%时,各因素取值范围:热解炭黑掺量为 10%、拌合时间为 90~120 s、拌和温度为 170~180 ℃、矿料加热温度为 170~180 ℃。

2.3 干法 TPCB 改性沥青混合料优化制备参数的确定

为获得动稳定度大于 3 200 次/mm、冻融劈裂强度比 TSR 大于 78%的 TPCB 改性沥青混合料,本研究通过直观分析、方差分析和多因素相互作用分析,综合考虑得到优化的干法 TPCB 改性沥青混合料制备参数:热解炭黑掺量为 10%、拌合时间为 90 s、拌合温度为 170~180 ℃、矿料加热温度为 170~180 ℃。根据前述干法 TPCB 改性沥青混合料制备设计的条件,完整的干法 TPCB 改性沥青制备程序为将加热温度 170~180 ℃的粗细集料和 10%TPCB 置于拌合机干拌 15 s,然后加入 160 ℃基质沥青湿拌 90 s,最后加入加热的矿粉拌和 90 s,拌合温度为 170~180 ℃。

3 干法 TPCB 改性沥青混合料路用性能检验

将制备好的车辙板在常温中放置 48 h 后,在 60 ℃放入车辙试验仪中保温 5 h,保温结束后即开始车辙试验,以检测 TPCB 改性沥青混合料的动稳定度。车辙试验结果如表 13 所示。由表 13 可知:TPCB 改性沥青混合料的动稳定度满足规范对改性沥青的技术要求,且同比技术要求值高出 9.7%。这是由于 TPCB 材料具有较高的模量,干法施工中与沥青结合的部分可提高沥青的黏度,进而提高高温性能。

表 13 车辙试验结果

试验编号	动稳定度/(次/mm)	动稳定度平均值/(次/mm)	动稳定度技术要求/(次/mm)
平行试验一	3 056		
平行试验二	3 524	3 293	≥3 000
平行试验三	3 298		

将制备好的小梁试件放入-10 ℃恒温恒湿试验箱中保温,然后取出并采用 MTS 试验机进行弯曲试验。试验温度为-10 ℃,试验加载速率为 50 mm/min。试验结果如表 14 所示。由表 14 可知:干法 TPCB 会增大沥青混合料开裂的风险,但 TPCB 改性沥青混合料的最大弯拉应变仍能满足规范对改性沥青混合料的技术要求。

表 14 低温弯曲试验结果

试验编号	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	弯曲劲度模量/MPa	弯拉应变技术要求/ $\mu\epsilon$
平行试验一	8.411	2 403	3 500	
平行试验二	8.138	2 419	3 364	≥2 400
平行试验三	8.533	2 494	3 421	

采用浸水马歇尔试验和冻融循环劈裂试验来评价 TPCB 改性沥青混合料的水稳定性能。浸水马歇尔试验和冻融循环劈裂试验的结果如表 15 和表 16 所示。由表 15 和表 16 可知:TPCB 改性沥青混合料的残留稳定度和冻融劈裂强度比 TSR 均满足规范对改性沥青混合料的技术要求,且同比技术要求值提高 10%。

表 15 浸水马歇尔试验结果

试验编号	30 min 稳定度/kN	48 h 稳定度/kN	残留稳定度/%	残留稳定度平均值/%	残留稳定度技术要求/%
平行试验一	9.51	8.58	90.2		
平行试验二	9.92	9.07	91.4	90.2	≥80
平行试验三	9.03	8.03	88.9		

表 16 冻融劈裂试验结果

试验编号	冻融组劈裂强度/MPa	非冻融组劈裂强度/MPa	TSR/%	TSR 平均值/%	TSR 技术要求/%
平行试验一	0.482	0.592	81.4		
平行试验二	0.524	0.632	82.9	83.0	≥70
平行试验三	0.512	0.605	84.6		

4 结论

1) 热解炭黑掺量对干法 TPCB 改性沥青混合料性能指标的影响最大. 改变热解炭黑掺量要适当调整干法 TPCB 改性沥青混合料的制备参数.

2) 以路用性能最佳为目标, 确定了 10%TPCB 改性沥青 AC-13 混合料的干法制备参数.

3) 所确定的参数制备干法 TPCB 改性沥青混合料, 其路用性能均满足规范对改性沥青混合料的技术要求, 且抗高温稳定性和抗水损害性指标明显提高.

参考文献:

- [1] 甘有为. 再生炭黑改性沥青机理研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [2] Gan Y, Li C, Chen A, et al. A Model of Pyrolysis Carbon Black and Waste Chicken Feather Using a Response Surface Method in Hot-Mix Asphalt Mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(11): 04022278.
- [3] González J F, Encinar J M, Canito J L, et al. Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2001, 58: 667-683.
- [4] Sienkiewicz M, Borzędowska-Labuda K, Wojtkiewicz A, et al. Development of methods improving storage stability of bitumen modified with ground tire rubber: A review[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 159: 272-279.
- [5] 禹辉, 孟潇飞, 甘新众, 等. 干投法废轮胎热解炭黑改性沥青表面层首件工程工艺试验研究[J]. 公路, 2022, 67(2): 7-15.
- [6] 周作艳. 废旧轮胎热解炭黑的改性及应用研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [7] Lee K H. Performance Evaluation of Dense Graded Asphalt Mixture Modified by Pyrolysis Carbon Black[J]. Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 2016, 17(3): 732-737.
- [8] 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.
- [9] 田泉. 废旧轮胎热解炭黑改性沥青制备及其混合料性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
- [10] Li C, Ning F, Li Y. Effect of carbon black on the dynamic moduli of asphalt mixtures and its master curves[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2019, 13(4): 918-925.
- [11] 交通运输部公路科学研究院, 长沙理工大学, 山西利达环保科技有限公司, 等. 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]. 2017.
- [12] 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.
- [13] 陈超, 范子然, 李闯民. 基于高黏剂改性透水沥青混合料的工艺对比研究[J]. 中外公路, 2020, 40(3): 237-240.
- [14] Gan Y, Li C, Zou J, et al. Evaluation of the impact factors on the leaching risk of steel slag and its asphalt mixture[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 16: e01067.
- [15] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011[S]. 2011.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004[S]. 2004.
- [17] 交通运输部公路科学研究院. 公路工程集料试验规程: JTG E42—2005[S]. 2005.