

掺废轮胎橡胶颗粒碎石封层黏结性研究

陈建民¹, 刘东海², 王锦余³, 刘浩志³

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200; 2. 湖南省茶江高速公路建设开发有限公司, 湖南 长沙 410204;
3 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410014)

摘要:为提高废旧轮胎的再利用率,降低环境污染,将废轮胎橡胶颗粒等体积替换碎石制备新型橡胶颗粒碎石封层路面。通过橡胶颗粒表面的处理,确保橡胶颗粒碎石封层沥青-集料间的黏附性,对不同集料粒径及橡胶掺量的碎石封层试件纹理特性进行评价,将橡胶颗粒掺量、集料粒径占比、脱落率、构造深度及摆式摩擦系数5个指标通过SPSS进行关联并评价,并以MMLS3试验模拟行车荷载,探究外界水温对其黏附强度的影响特性。研究结果表明:采用1.5%热沥青预裹覆的橡胶颗粒可有效改善碎石封层的集料脱落;脱落率与构造深度会伴随7.1~9.5 mm粒径占比及橡胶颗粒比例的增加有所上升;摆式摩擦系数与橡胶颗粒掺量增高呈现相反趋势;低温单因素对碎石封层集料脱落的影响大于高温和浸水,而水-温耦合会使集料松散性加剧;整体而言,为确保碎石封层集料与沥青间具有较好的黏附强度,橡胶颗粒掺量与热沥青裹覆用量分别不宜超过50.0%、1.5%。

关键词:碎石封层;废旧轮胎橡胶;黏附特性;回收利用;绿色路面

中图分类号:U414

文献标志码:A

Bonding Performance of Chip Seal Containing Waste Tire Rubber Particles

CHEN Jianmin¹, LIU Donghai², WANG Jinyu³, LIU Haozhi³

(1.Hunan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha, Hunan 410200, China; 2.Hunan Chajiang Expressway Construction and Development Co., Ltd., Changsha, Hunan 410204, China; 3.School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: In order to promote the reuse of waste tires and reduce environmental pollution, chips were replaced with the same volume of waste tire rubber particles to prepare a new rubber particle chip seal pavement. In order to ensure the bonding between asphalt and aggregate of the rubber particle chip seal, the surface of rubber particles was processed, and the texture characteristics of chip seal specimens with different aggregate particle sizes and rubber content were evaluated. The five indexes of rubber particle content, aggregate particle size ratio, shedding rate, structural depth, and pendulum friction coefficient were correlated and evaluated by SPSS, and the MMLS3 test was conducted to simulate the driving load, so as to explore the influence of external water temperature on the bonding strength. The results show that the rubber particles pre-coated with 1.5% hot asphalt can effectively improve the aggregate shedding of the chip seal. The shedding rate and structural depth will increase with the increase in particle size in the range of 7.1–9.5 mm and rubber particle ratio. The pendulum friction coefficient shows the opposite trend with the increase in rubber particle content. The influence of low-temperature single factor on the aggregate shedding of the chip seal is greater than that of high temperature and water immersion, while water-temperature coupling will aggravate the looseness of aggregates. Overall, in order to ensure that the chip seal aggregate and asphalt have good bonding strength, the rubber particle content and the amount of hot asphalt for coating should not exceed 50.0% and 1.5%, respectively.

Keywords: chip seal; waste tire rubber; bonding properties; recycling; environmentally friendly pavement

收稿日期:2024-06-26

基金项目:长沙理工大学道路结构与材料交通行业重点实验室开放基金资助项目(编号:No.kfj210301)

作者简介:陈建民,男,硕士,高级工程师.E-mail:503293503@qq.com

0 引言

随着中国公路建设突飞猛进的发展和公路使用年限的增加,目前已经进入沥青路面的大规模维修养护期,道路工作的重心也逐步由建设转为养护。截至 2022 年底,公路养护里程已占据总里程的 99.92%。交通运输部“十四五”公路养护管理发展纲要提出,在“十四五”期间要全面加强公路养护管理,推动公路养护管理高质量发展。其中,关键的一步就是找到适用性强、养护成本低的路面预防性养护措施。既可以有效延缓路面病害的发展,延长道路服役寿命,也可以因其良好的施工便利性被进一步推广普及。因此,在道路建养同步的转型中找到合理的预防性路面养护类型,对推动道路高质量发展与增进社会经济效益均具有重要意义^[1-2]。

20 世纪 90 年代末,用于道路铺筑的乳化沥青碎石封层开始被美国广泛用于沥青路面预防性养护^[3],并利用不同材料的复合设计对路用性能进行提升。Mallick 等^[4]在碎石封层中加入高反射率材料,降低表面热量吸收,提高其抗老化性能;Adams 等^[5]利用花岗岩做骨料提高碎石封层的平均初始轮廓深度,获得良好交通荷载承载力。中国有关碎石封层技术修复破损路面最早出现在 2002 年,并对关键技术与经验进行了总结与验证^[6-7]。因其良好的施工便利性与经济性被广泛接受,但普通沥青或乳化碎石封层仍然存在集料易松散、耐磨性差等问题^[8]。为此,中国学者研究路面材料组成与设计,以期提高碎石封层的路用性能。谢祥根^[9]采用 SBS 高温改性沥青与碎石封层加铺路面技术结合,提高路面的密水性及抗滑性;杜隽^[10]、孙行营^[11]、王航等^[12]在沥青碎石封层中掺入纤维,提高乳化沥青碎石封层的抗滑与抗磨损性能,丰富了纤维碎石封层应用技术;臧芝树^[13]则以废旧橡胶改性沥青作为碎石封层的黏结剂,增强碎石封层的黏结性能以抵抗动水压力的侵蚀,提高路面水稳性与使用寿命;龚演等^[14]在沥青中掺入橡胶和玻璃纤维,提高碎石封层的黏结性能。废旧橡胶因其减震抗裂等性能在路面材料中呈现出诸多优势,并且从环境保护的角度出发,现阶段在路面材料中应用较多。但目前大部分是以少量橡胶粉的形式混入沥青胶浆,对大颗粒和高掺量的废弃轮胎橡胶,使用相对较少。研究橡胶颗粒代替骨料在沥青

混合料中的应用鲜见。李东彪等^[15]将橡胶颗粒以骨料形式掺入沥青混合料,探究橡胶颗粒对沥青混合料的性能影响,结果显示橡胶颗粒可改善沥青混合料的低温抗裂性能、抗疲劳性及高温稳定性;余苗等^[16]利用橡胶颗粒代替集料,分析橡胶改性沥青混合料的黏弹性变化规律,发现橡胶颗粒的掺入可提高混合料的弹性恢复能力和高温稳定性;Pourhassan 等^[17]在碎石封层中掺入橡胶颗粒作为骨料,得出在不同荷载作用下其路表宏观纹理损失相较于普通沥青混合料下降了 23%。为保证橡胶颗粒与沥青的黏附性,有研究对胶粒表面进行了预处理,孟会林^[18]采用环烷油预处理技术,增加橡胶颗粒与沥青之间的附着力;董瑞琨等^[19]采用过氧化苯甲酰为氧化剂增加胶粒表面活性,增加了其与沥青之间的界面作用力。

碎石封层技术在中国应用已有 20 多年,但其普及程度并没有达到欧美等国家的水平。碎石封层内部集料和沥青之间的黏附性问题,是制约其道路养护领域进一步发展的主要原因。而从材料组成、掺量及处理手段等不同角度提升碎石封层的黏附性能,是解决其利用率低的有效举措。因此,本文采用预处理橡胶颗粒替代碎石封层中的部分集料,以解决废旧橡胶的大规模再利用问题,并进一步研究具有降低集料脱落率的新型橡胶颗粒碎石封层。对橡胶颗粒碎石封层的结构纹理进行表征,将其评价指标进行关联性分析和建模,同时研究不同水温条件对橡胶颗粒碎石封层沥青-集料间黏附性能的影响。

1 原材料及试验方法

1.1 原材料

1.1.1 沥青

集料和沥青的黏附强度与沥青的含水率有极大关联,在保证良好黏附强度的情况下,对沥青与集料的固化速率有一定要求^[20]。试验采用阳离子 SBR 改性乳化沥青(PCR),根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)测试其技术性能,结果见表 1。

1.1.2 集料

为提高碎石封层集料-沥青的黏附强度,本文采用含有钠镁氧化物的石灰岩和表面较粗糙的常温橡胶颗粒为集料^[21]。分别依据《公路工程沥青及沥青

混合料试验规程》(JTGE20—2011)和《橡胶沥青路面技术标准》(CJJ/T273—2019)测试其基本路用性能,结果见表2、3。

表1 乳化沥青技术性能

Table 1 Technical performance of emulsified asphalt

技术指标	单位	技术要求	测试结果
破乳速度		快裂或中裂	中裂
筛上残留物(1.18 mm 筛)	%	≤0.10	0.08
道路标准黏度计 C _{25,3}	s	8~25	23
残留分含量	%	≥50	51
针入度(25℃,5 s,100 g)	0.1 mm	40~120	60
延度(5℃)	cm	≥20	25
软化点	℃	≥50	68
与粗集料的黏附性,裹覆面积		≥2/3	>2/3

表2 石灰岩技术性能

Table 2 Technical performance of limestone

试验项目	单位	技术要求	实测值
压碎值	%	≤6	23.8
洛杉矶磨耗损失	%	≤28	17.45
针片状含量	%	≤15	14.04
松散碎石单位质量	kg/m ³	—	1 254
黏附性	级	≥4	5

表3 橡胶颗粒技术性能

Table 3 Technical performance of rubber particles

试验项目	单位	实测值	技术要求
灰分	%	4.5	≤10.0
橡胶含量	%	51.0	≥48.0
丙酮抽出物	%	8.0	≤14.0
纤维含量	%	0.5	≤1.0
含水率	%	0.6	≤1.0

由表1~3可知:原材料技术要求均满足陕西省地方标准《同步碎石封层施工技术规范》(DB 61/T914—2014)^[22]的规定(该规范以下简称 Shaanxi Standard)。

1.2 橡胶颗粒预处理

橡胶材料表面较为光滑,可提供的极性作用能仅为0.91 mJ/m²,导致其与乳化沥青的黏附性大大降低。为改善橡胶颗粒在碎石封层与集料间的黏附性,在160~165℃高热条件下,将橡胶颗粒与东海70#基质沥青拌和90 s,对橡胶颗粒进行预裹覆处理。由于橡胶颗粒与沥青颜色相近,无法精准判断沥青

裹覆情况,因此采用4.75~9.5 mm的石灰岩代替。其中,4.75~9.5 mm集料预裹覆用量一般为所用集料质量的0.5%~1.5%^[23],故沥青用量拟为石料质量的0.5%、1.0%、1.5%、2.0%,观察裹覆后石灰岩表面沥青覆盖情况,见图1。

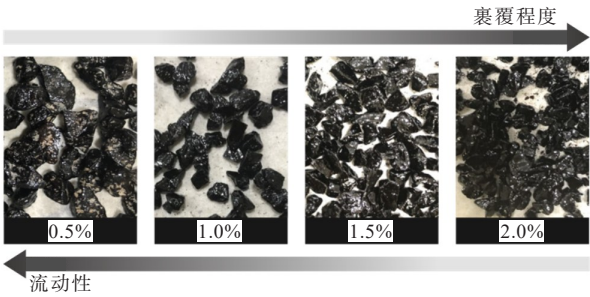


图1 不同沥青裹覆用量下的石灰岩预裹覆

Figure 1 Limestone pre-coating under different asphalt amounts

由图1可知:随着沥青用量增加,石料裸露面积越小。当裹覆用量为1.0%和1.5%时,石料裹覆均匀且冷却后无团聚现象。

1.3 考虑粒径及橡胶颗粒掺量的试验设计

本文试验将石灰石与橡胶颗粒按4.75~7.1 mm和7.1~9.5 mm两种粒径进行分档,通过改变两者占比,研究橡胶颗粒对碎石封层黏附性能的影响。以质量百分比为25%的间隔从0到100%设置4.75~7.1 mm粒径的集料占比。对所掺入的橡胶颗粒,按25%的间隔从0到100%与碎石进行等体积替换,综合考虑集料粒径大小和橡胶颗粒占比两个因素,具体设计见表4。

1.4 试验方法

1.4.1 黏聚力试验

为探究预裹覆橡胶颗粒与PCR间的黏聚力大小,参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)要求,采用LDNJ-II型黏聚力试验仪进行稀浆混合料黏聚力试验,并利用TLB型测力扳手(量程0~6 N/m)施加0.193 MPa压力测试扭力大小(图2)。该试验利用扭力模拟碎石封层试件所受外部车辆荷载力,以扭矩值表征黏附强度。

1.4.2 扫刷试验

为了探究碎石封层试件在不同集料组成与多种复合作用下碎石封层的抗松散能力,根据扫刷试验(ASTM D7000),采用SYD-0752型乳化沥青湿轮磨耗仪[自转(140±2) r/min、公转(61±1) r/min]来进

表 4 不同粒径集料及橡胶掺量设计

Table 4 Design of different particle sizes and rubber contents

标号	集料粒径质量占比/%		不同集料体积占比/%	
	4.75~7.1 mm	7.1~9.5 mm	橡胶颗粒	石料
A	100	0	100	100
			25	75
			50	50
			75	25
			100	0
B	75	25	0	100
			25	75
			50	50
			75	25
			100	0
C	50	50	0	100
			25	75
			50	50
			75	25
			100	0
D	25	75	0	100
			25	75
			50	50
			75	25
			100	0
E	0	100	0	100
			25	75
			50	50
			75	25
			100	0



图 2 黏聚力测定

Figure 2 Determination of bonding force

行碎石封层集料脱落率试验(图 3)。通过计算扫刷前后试件的集料脱落率来评价其抗松散能力,具体计算见式(1):

$$\text{脱落率} = \frac{\Delta m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Δm 为扫刷前后集料质量变化值(g); m_0 为集料设计用量(g)。



图 3 脱落率测定

Figure 3 Determination of shedding rate

1.4.3 表面纹理测定试验

(1) 铺砂法测定

与集料-沥青内部黏结强度对路面抗剪性能的作用效应不同,碎石封层路面外部表层的粗糙程度对抗剪性能的影响也尤为重要。根据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019),采用手工铺砂法测定碎石封层试件的构造深度(图 4)。该试验通过测量构造深度表征试件的表面粗糙度,进而揭示碎石封层试件表面的抗剪能力,计算见式(2):

$$D_{TD} = \frac{1000V}{\pi R^2/4} = \frac{31831}{R^2} \quad (2)$$

式中: V 为构造砂体积(mL),取 25 mL; R 为摊平砂的平均直径(mm)。



图 4 路面构造深度测定

Figure 4 Determination of structural depth of pavement

(2) 摆式仪测定

根据吴凡等^[24]的研究,路面微观纹理对低速行车的安全性有显著影响,而摩擦系数是描述路面抗滑值的重要指标。根据《公路路基路面现场测试规程》(JTG 3450—2019),采用 BM-III 型摆式摩擦系数测定仪测定橡胶颗粒碎石封层路面的摆式摩擦系数,间接评价碎石封层试件表面的微观纹理(图 5)。摆式摩擦系数根据式(3)进行计算:

$$B_{BPN,20} = B_{BPN,T} + \Delta B_{BPN} \quad (3)$$

式中: $B_{BPN,20}$ 为换算成标准温度 20℃时的摆式摩擦系

数; $B_{BPN,T}$ 为路面温度 T 时测得的摆式摩擦系数; ΔB_{BPN} 为摆式摩擦系数温度修正值,见表5。

表 5 温度修正值
Table 5 Temperature correction value

温度/℃	温度修正值	温度/℃	温度修正值
0	6	25	2
5	4	30	3
10	3	35	5
15	1	40	7
20	0		



图 5 摆式摩擦系数测定

Figure 5 Determination of pendulum friction coefficient

1.4.4 MMLS3 试验

为探究不同水、温和水-温条件下不同橡胶颗粒掺量的碎石封层抗松散能力,采用 MMLS3(Model Mobile Load Simulator at 1/3rd scale)设备模拟实际行车荷载对碎石封层试件沥青-集料间黏附性能的影响。该设备控温范围为 $5\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,轮载压力为 $1.9\sim 2.7\text{ kN}$,直径为 300 mm 试验轮胎最大轮压为 850 kPa ,最大加载频率为 $7\text{ }200\text{ 次/h}$,见图6。主要试验内容:①根据 Shaanxi Standard 设计及计算 PCR 用量为 2.23 kg/m^2 、石灰岩用量为 7.91 kg/m^2 ,制备 $10\text{ cm}\times 40\text{ cm}$ 的长条形试件;②利用旋转压实成型制作多个直径 $150\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 圆柱形 HMA 混合料试件,然后按照试槽尺寸要求进行切割;③利用胶水将厚度为 10 mm 的碎石封层试件固定在 HMA 混合料试件顶部;④试验设定轮胎接地压强与加载频率分别为 0.7 MPa 、 $7\text{ }200\text{ 次/h}$,设定 30 min 、 60 min 、 120 min 不同加载时长,开启横向摆动功能对试件进



图 6 MMLS3 试验
Figure 6 MMLS3 test

行加载,对加载后的试件集料的损失质量进行测定。

2 橡胶颗粒碎石封层黏附特性研究

2.1 橡胶颗粒预裹覆研究

在室温 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,通过稀浆混合料黏聚力试验,测定不同沥青裹覆量的橡胶颗粒与 PCR 的黏聚力水平。为保证 PCR 与集料间良好的黏附性能,根据所选 PCR 蒸发至 80% 含水率所需时间,选择在 7 h 、 20 h 、 48 h 时长下测定黏聚力,试验结果见表6、图7。

表 6 橡胶颗粒与 PCR 黏聚力
Table 6 Rubber particles and PCR bonding force

预裹覆沥青用量/ %	黏聚力/($\text{N}\cdot\text{m}$)		
	7 h	20 h	71 h
0.0	0.80	1.34	1.85
0.5	1.06	2.08	2.75
1.0	1.25	2.36	3.05
1.5	1.50	2.52	3.20
2.0	1.54	2.60	3.25

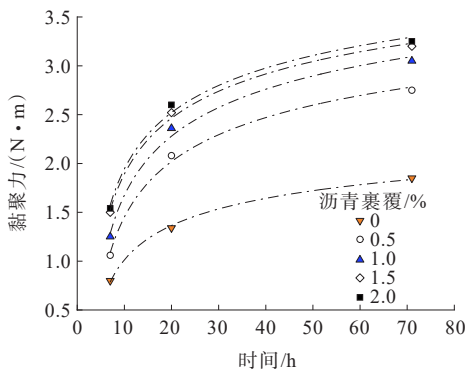


图 7 橡胶颗粒与 PCR 黏聚力变化曲线
Figure 7 Change curve of bonding force between rubber particles and PCR

由表6、图7可知:橡胶颗粒与 PCR 间的黏聚力均随时间的增加而变大。在 20 h 内,黏聚力增长率相对较高,平均增长率约为 77.87% ,随后趋于平稳状态,平均增长率约为 30.30% 。当裹覆沥青用量为 1.0% 、 1.5% 和 2.0% 时的黏聚力增长率,相较 20 h 时的无裹覆沥青橡胶颗粒,分别提高 76.12% 、 88.06% 和 94.03% ,表明随着裹覆沥青用量的增加,橡胶颗粒的黏聚力改善效果也呈现出先快后缓的趋势,且当橡胶颗粒的沥青裹覆用量超过 1.5% 时,其黏聚力提升不再明显。考虑到橡胶颗粒在裹覆后流动性变差

不利于与石料的拌和均匀^[25],选取 1.5% 为最佳沥青裹覆用量。

2.2 集料脱落率

PCR 与分别为 2.23 kg/m^2 与 7.91 kg/m^2 的石灰岩用量标准制作扫刷试件(直径为 280 mm)。考虑不同粒径大小及橡胶颗粒占比对脱落率所造成的影响,并将预处理橡胶颗粒与橡胶颗粒制备的扫刷试件脱落率结果进行对比,试验结果见图 8、9。

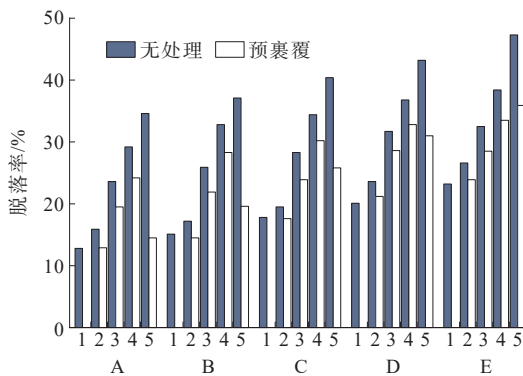


图 8 扫刷试验集料脱落率

Figure 8 Aggregate shedding rate in sweep brush test

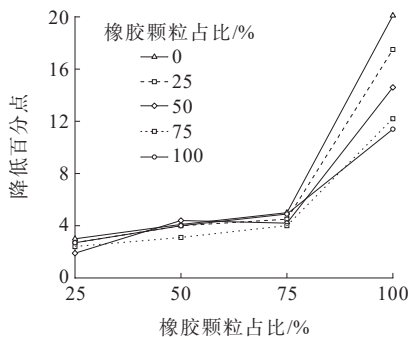


图 9 预裹覆封层脱落率降低百分点(粒径为 7.1~9.5 mm)

Figure 9 Shedding rate reduction of pre-coated chip seal in terms of percentage points (particle size of 7.1~9.5 mm)

由图 8、9 可知:7.1~9.5 mm 粒径的集料占比从 50% 增加至 100% 时,平均脱落率增加了 19.66%,表明增加 7.1~9.5 mm 粒径集料的占比会使碎石封层试件的空隙率提高,密实性降低,从而使其脱落率增加。随着无处理橡胶颗粒占比的增加,脱落率也随之增加,当橡胶颗粒占比为 25%、50%、75%,脱落率增加 6~7 个百分点;对橡胶颗粒的预裹覆处理后,相较于同体积橡胶颗粒占比的脱落率降低 3~5 个百分点,但当橡胶颗粒占比 100% 时,平均脱落率降低超过 15 个百分点。这是因为脱落率以扫刷前后质量变

化为评价指标,而同体积下橡胶颗粒质量远低于石料,扫刷前后质量变化较小,造成脱落率的结果偏大。

2.3 表面纹理

2.3.1 构造深度

为评定碎石封层表面纹理构造,采用铺砂法进行试验,将粒径为 0.15~0.30 mm 的构造砂,用手均匀摊铺在试件表面,使砂填入试件表面的空隙,直至表面不再有浮动的余砂,同一试件测 3 次取其平均值,测得碎石封层试件表面扫刷前后的构造深度,结果见图 10。

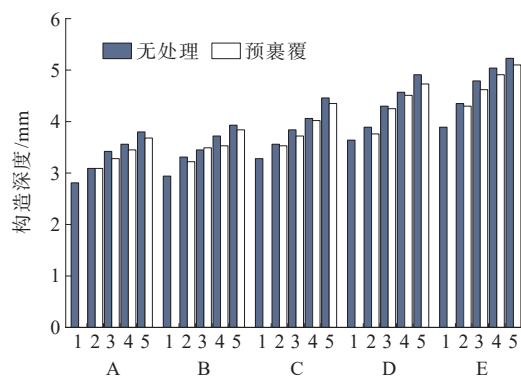


图 10 不同试件构造深度 D_{TD}

Figure 10 Structural depth D_{TD} of different specimens

由图 10 可知:当无处理碎石封层试件 7.1~9.5 mm 粒径的集料占比从 50% 增加至 100% 时,平均构造深度约增加 21.21%。这是因为随着大粒径集料占比增加,碎石封层内部会形成骨架嵌挤结构,增大集料间的空隙,继而使路面变粗糙。当不考虑集料粒径占比的影响,50% 无处理橡胶颗粒的平均构造深度相较于 0 橡胶颗粒占比增加约 19.48%。表明随着橡胶颗粒掺量的增加,构造深度也随之增加。主要原因是同种试验条件下橡胶颗粒更难密实且具有一定软弹性,所制试件表面不均匀,造成细砂摊铺面积减小。橡胶颗粒预处理对路面构造深度无明显影响,在 7.1~9.5 mm 粒径的集料占比 100% 的条件下,预裹覆后的平均构造深度仅降低 0.09 mm。

2.3.2 摆式摩擦系数

摩擦系数可间接反映路表微观纹理,采用摆式摩擦仪对 25 组橡胶颗粒碎石封层试件表面摩擦系数进行测定, ΔB_{BPN} 参照表 4 取 0。为精准测定,在测量时每个试件需要摆式仪测量 5 次,并取 5 次测定的平均值作为试验结果,若单组数据中出现极差大于 3,

则重新进行测定,试验结果见图 11、12。

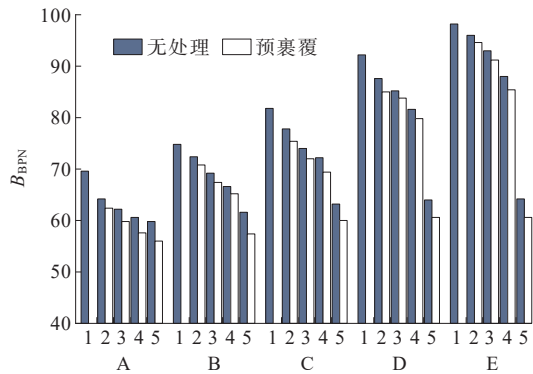


图 11 不同试件摆式摩擦系数

Figure 11 Pendulum friction coefficient of different specimens

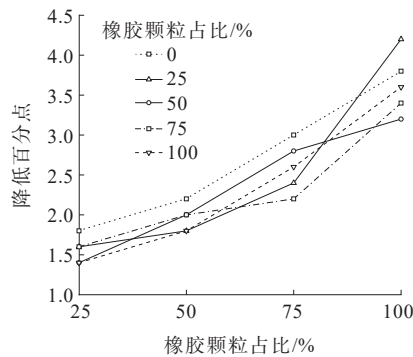


图 12 预裹覆封层摆式摩擦系数(粒径为 7.1~9.5 mm)

Figure 12 Pendulum friction coefficient of pre-coated chip seal (particle size of 7.1–9.5 mm)

由图 11、12 可知:当粒径为 7.1~9.5 mm 的集料占比从 0 增加至 100% 时,碎石封层试件的摆式摩擦系数由 87.88 降低至 63.28,降低幅度约为 27.99%。这表明摆式摩擦系数随粒径为 7.1~9.5 mm 的集料比例增大呈现稳定增长的现象。无处理橡胶颗粒占比为 0、25%、50%、75%、100% 时,平均摩擦摆式系数分别为 83.32、79.60、76.60、73.80、62.56,摆式摩擦系数随着橡胶颗粒占比的增加逐渐降低。这可能是由于橡胶材料的刚度较低导致摩擦滞后分量较小,且滑块和试件间接触面积较小,轮胎摩擦阻滞力较低^[26]。通过对橡胶颗粒预裹覆处理后,会在颗粒表面形成较为光滑的沥青膜,使摆式摩擦系数平均降低 3.25%。

2.4 SPSS 关联性分析

2.4.1 Pearson 相关性

根据橡胶颗粒碎石封层的纹理特性表征结果,选择 4.75~7.1 mm 粒径占比、脱落率、摆式摩擦系

数、预裹覆工艺、橡胶颗粒掺量和构造深度 6 种变量为研究对象,通过 SPSS 统计软件,采用 Pearson 相关性分析方法,验证各变量之间是否具有变化关联性。此外,在 Pearson 相关性分析前,需要检验各变量是否具有正态分布,本文采用 Jarque-Bera 检验进行判断,若 p 值 $<5\%$,则拒绝服从正态分布的原假设。因预裹覆工艺为分类变量,现仅对其他 5 个连续性变量进行检验,结果见表 7。

表 7 Jarque-Bera 检验

Table 7 Jarque-Bera test

名称	χ^2	df	p 值
4.75~7.1 mm 粒径占比	3.169	2	0.214
脱落率	1.247	2	0.545
摆式摩擦系数	3.635	2	0.171
橡胶颗粒掺量	2.617	2	0.245
构造深度	2.043	2	0.356

由表 7 可知:5 个连续性变量 p 值均大于 5%,不拒绝服从正态分布的原假设,该变量样本组间服从正态特性,可以进行 Pearson 相关性分析,结果见表 8。

表 8 Pearson 相关性分析

Table 8 Pearson correlation analysis

变量	4.75~7.1 mm 粒径占比	橡胶颗粒掺量	脱落率	构造深度	摆式摩擦系数
4.75~7.1 mm 粒径占比	1.000				
橡胶颗粒掺量	0.000	1.000			
脱落率	-0.491**	0.692**	1.000		
构造深度	-0.797**	0.572**	0.821**	1.000	
摆式摩擦系数	-0.717**	-0.576**	-0.021	0.232	1.000

注:**表示通过 5%、1% 显著性水平。

由表 8 可知:4.75~7.1 mm 粒径占比与摆式摩擦系数、构造深度和脱落率之间呈现负相关,增加 4.75~7.1 mm 粒径占比,脱落率、构造深度与摆式摩擦系数均呈降低趋势;橡胶颗粒掺量与脱落率、构造深度显著正相关,和摆式摩擦系数存在负相关关系,橡胶颗粒掺量的增加会造成碎石封层整体刚度下降,导致脱落率和构造深度增加,摆式摩擦系数减小;脱落率与构造深度之间显著正相关,两者均受粒径尺寸占比的影响,大粒径集料占比增加时,碎石封层的空隙率也会增加,从而使构造深度和脱落率均增加。

2.4.2 预估模型建立

基于上述研究,为更直观地描述各变量之间所呈现出的线性趋势,以4.75~7.1 mm粒径占比 X_1 、橡胶颗粒掺量 X_2 为自变量;以脱落率 Y_1 、构造深度 Y_2 、摆式摩擦系数 Y_3 为因变量。根据式(4)线性关系式进行表征,结果见表9。

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 \quad (4)$$

式中: a 、 b_1 、 b_2 均为拟合参数。

表9 预测模型

Table 9 Prediction model

变量	X_1	X_2	R^2
Y_1	-0.116	0.176	0.726
Y_2	-0.014	0.011	0.932
Y_3	-0.246	-0.213	0.828

由表9可知:该预估模型的相关系数均大于0.7,具有较好的相关性。 X_1 对 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 的系数均为负,这对降低脱落率有正向作用,但对构造深度和摩擦系数存在负效应; X_2 对 Y_1 和 Y_2 有正效应,对 Y_3 有负向作用。可见,该模型的系数与试验结果一致。

3 橡胶颗粒碎石封层黏附性能影响因素研究

考虑材料优选组合对橡胶颗粒碎石封层集料-沥青间黏附性能影响明显,石灰岩选择粒径为4.75~7.1 mm,橡胶颗粒采用等体积掺入0%、25%、50%、75%和100% 5个梯度的橡胶颗粒,并对橡胶颗粒采取1.5%热沥青预裹覆处理。在以下3个条件对试件进行处理(低温养护前,先将试件常温浸泡,再放入-10℃环境中):①温度分别为-10℃、25℃和50℃;②温度为25℃,浸水时长分别为6 h、12 h和48 h;(3)不同浸水时间(6 h、12 h和48 h)及不同温度(-10℃、25℃和50℃)。随后,置于MMLS3设备在常温下进行试验,记录30 min、60 min、120 min时集料质量变化,根据试件加载前后的质量之比,计算出试件骨料保持率,以反映不同水、温和水-温对橡胶颗粒碎石封层集料-沥青间黏附性能的影响,试验结果见图13~17。其中,因MMLS3温度设置范围具有局限性,故低温模拟试验前将试件放入-10℃冰箱中养护24 h。

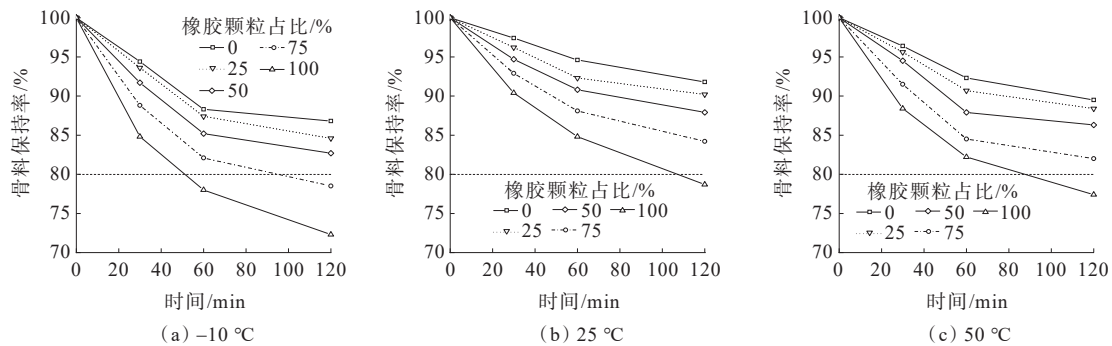


图13 不同温度下橡胶颗粒碎石封层集料保持率

Figure 13 Aggregate retention rate of rubber particle chip seal at different temperatures

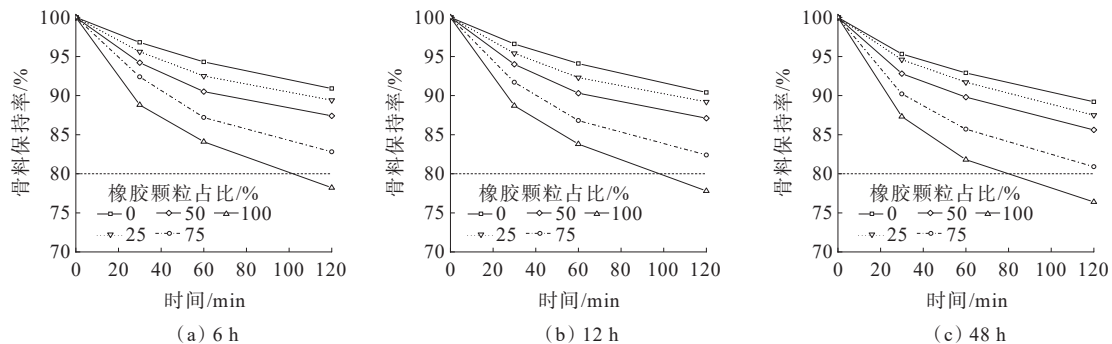
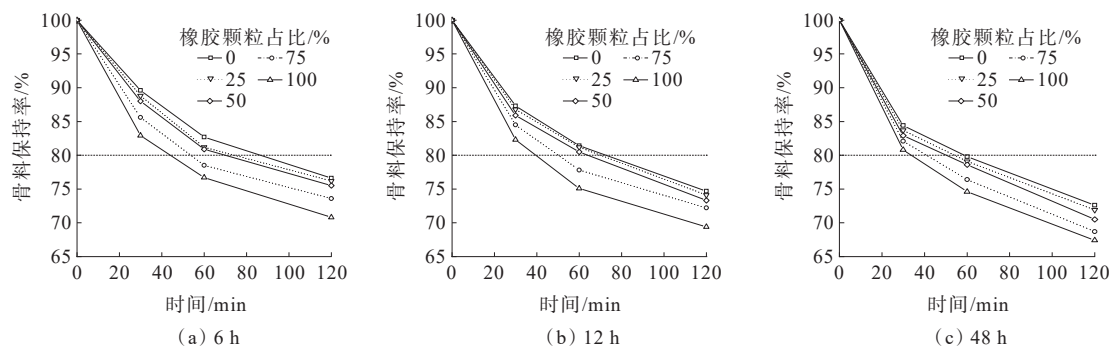
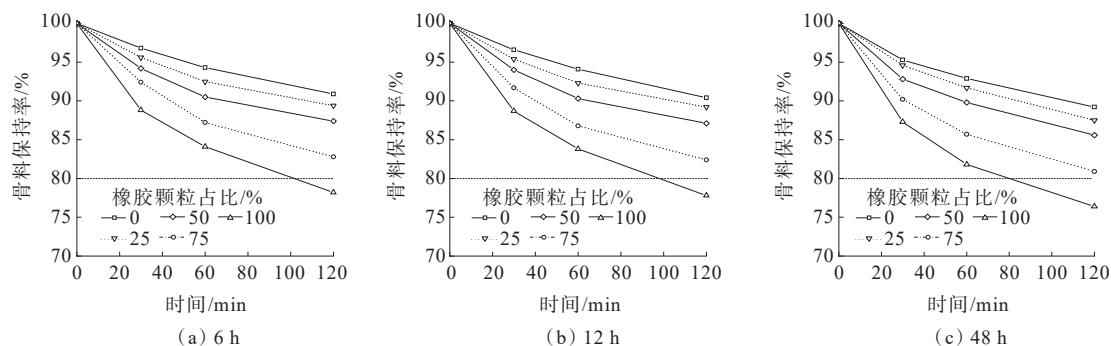
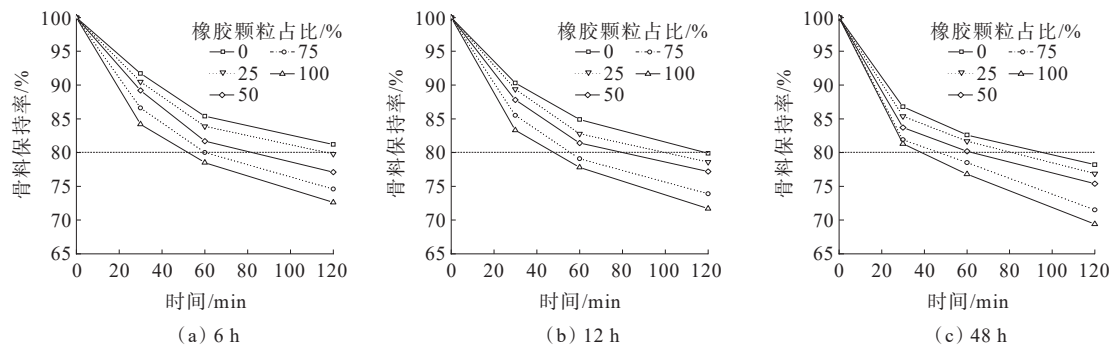


图14 不同浸水时间下橡胶颗粒碎石封层集料保持率

Figure 14 Aggregate retention rate of rubber particle chip seal under different soaking time

图15 在温度 -10°C 、不同浸水条件下橡胶颗粒碎石封层集料保持率Figure 15 Aggregate retention rate of rubber particle chip seal at -10°C under different soaking conditions图16 在温度 25°C 、不同浸水条件下橡胶颗粒碎石封层集料保持率Figure 16 Aggregate retention rate of rubber particle chip seal at 25°C under different soaking conditions图17 在温度 50°C 、不同浸水条件下橡胶颗粒碎石封层集料保持率Figure 17 Aggregate retention rate of rubber particle chip seal at 50°C under different soaking conditions

由图13、14可知:①考虑单因素水、温度影响时, -10°C 、 25°C 、 50°C 无水条件下和48 h浸水条件下(25°C),碎石封层的平均脱落率分别为19.02%、13.44%、15.28%和16.08%。相比于 25°C 无水条件下的脱落率,低温对碎石封层脱落率增长的影响是浸水的2.11倍,表明低温单因素对碎石封层集料-沥青间黏附性的负面作用大于高温、水。考虑原因是低温条件下沥青变脆变硬,与集料间的黏附性降低,并在模拟荷载作用下产生脱落;②当橡胶颗粒掺量不高于50%时,碎石封层在 25°C 浸水条件下的集料保持率均值维持为82%~92%,各试件平均脱落率

相较于无橡胶处理试件仅增长1~3个百分点。表明常温浸水对集料的松散性破坏作用较小,能保证集料-沥青间具有良好的黏附性能。

由图15~17可知:考虑在多因素水-温耦合影响下, -10°C 、 50°C 时48 h的平均脱落率分别为29.78%、25.72%,相较于单因素的脱落率增长约为10.76%、6.7%,这与沥青的固有特性有关,高温沥青变软,低温沥青变脆裂,水分更易进入封层内部,导致集料脱落率大幅升高。

综上所述,橡胶颗粒碎石封层中橡胶颗粒占比不宜超过50%。

4 结论

本文通过等体积橡胶颗粒代替碎石封层中部分石料,并采用扫刷试验、手工铺砂法和路面抗滑摆值试验等手段,系统评估了橡胶颗粒碎石封层沥青-集料间的黏附特性,并建立预估模型。同时,还探究了不同水温条件对橡胶颗粒碎石封层集料-沥青界面黏附性能的影响,得出以下主要结论:

(1) 当橡胶颗粒预裹覆沥青用量为 1.5% 时,其与 PCR 间的黏聚力提升约 77.87%,但裹覆用量超过 1.5% 时,黏聚力平均增长约为 6%。

(2) 从不同粒径大小占比、橡胶颗粒掺量及不同处理方式下的路面纹理构造研究结果显示,预处理橡胶颗粒与降低大粒径集料占比,可有效减少碎石封层的脱落率;增大粒径集料占比和橡胶颗粒的掺量,虽然可提升路面粗糙度和路面的构造深度,但是橡胶颗粒的软弹性对路面的摆式摩擦系数产生了一定降低作用;橡胶颗粒预处理对碎石封层的构造深度及摩擦系数并无明显影响。

(3) 通过 Pearson 相关性分析,发现碎石封层的脱落率与 4.75~7.1 mm 粒径的集料占比以及橡胶颗粒掺量之间存在显著相关性;建立预估模型,该模型的系数与试验结果相吻合。

(4) 不同水温条件下,橡胶颗粒碎石封层集料的脱落率均表现出递减趋势;低温对橡胶颗粒碎石封层集料与沥青间黏附性能的负面影响更显著,相比之下,高温、浸水条件下的影响较小;在常温浸水条件下,集料平均保持率大于 80%,表明橡胶颗粒碎石封层沥青-集料间具有较好的黏附性能;在水-温耦合作用下,碎石封层的集料保持率会显著降低,建议橡胶颗粒掺量不宜超过 50%。

参考文献:

References:

- [1] 郭旺达,张金喜,张阳光,等.基于 IFS-TOPSIS 的预防性养护投资效益评价研究[J].中外公路,2022,42(5):246-251.
GUO Wangda, ZHANG Jinxi, ZHANG Yangguang, et al. Study on evaluation of investment benefit of preventive maintenance based on IFS-TOPSIS[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(5):246-251.
- [2] 朱浩然,张杨,马辉,等.微波辅助加热就地热再生在高速公路养护中的应用研究[J].中外公路,2023,43(5):37-42.
ZHU Haoran, ZHANG Yang, MA Hui, et al. Application and research of microwave-assisted heating hot in-place recycling in expressway maintenance[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5):37-42.
- [3] 郑平安.高性能双层碎石封层用于干线公路沥青面层的技术研究[D].西安:长安大学,2014.
ZHENG Ping'an. The research of high-performance double synchronized crushed stone seal for asphalt pavement of trunk roads[D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.
- [4] MALLICK R B, LI H, HARVEY J, et al. Pavement life - extending potential of geosynthetic-reinforced chip seal with high-reflectivity aggregates[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015, 2474(1):19-29.
- [5] ADAMS J M, RICHARD KIM Y. Mean profile depth analysis of field and laboratory traffic-loaded chip seal surface treatments[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2014, 15(7):645-656.
- [6] 李曦.碎石封层性能影响因素试验研究[D].长沙:长沙理工大学,2009.
LI Xi. The testing research on the contribution factor of rushed stone seal coat performance[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.
- [7] 刘贤惠,武泽锋,李巍,等.同步碎石封层技术简介[J].东北公路,2003(1):21-24.
LIU Xianhui, WU Zefeng, LI Wei, et al. Synchronous crushed stone seal coat technology[J]. Northeastern Highway, 2003(1):21-24.
- [8] 邓玉训,谢群.水性环氧乳化沥青碎石封层性能研究[J].中外公路,2019,39(3):260-264.
DENG Yuxun, XIE Qun. Study on the performance of chip seal of waterborne epoxy emulsified asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(3):260-264.
- [9] 谢祥根.同步碎石封层技术和 SBS 改性沥青防水层的应用研究[J].湖南交通科技,2007,33(1):10-13,44.
XIE Xianggen. Study on synchronous macadam sealing technology and application of SBS modified asphalt waterproof layer[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2007, 33(1):10-13,44.
- [10] 杜隽.纤维封层应用技术研究[D].大连:大连理工大学,2009.

- DU Jun. The research on the applicational technology of fiber seal coat[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [11] 孙行营. 改性乳化沥青同步碎石封层技术在沥青混凝土路面预防性养护中的应用[J]. 公路, 2013, 58(10): 219-223.
- SUN Xingying. Application of modified emulsified asphalt synchronous macadam seal technology in preventive maintenance of asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2013, 58(10): 219-223.
- [12] 王航, 徐安, 骆钊, 等. 纤维增强乳化沥青碎石封层抗裂性能研究[J]. 中外公路, 2019, 39(2): 265-268.
- WANG Hang, XU An, LUO Fan, et al. Study on crack resistance of fiber reinforced emulsified asphalt chipped seal[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 265-268.
- [13] 臧芝树. 橡胶沥青碎石封层路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- ZANG Zhishu. Study on the road performance of asphalt rubber gravel seal coat[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [14] 龚演, 严二虎, 袁海蛟, 等. 沥青路面玻璃纤维橡胶沥青碎石封层的层间黏结性能[J]. 公路交通科技, 2022, 39(增刊2): 1-9.
- GONG Yan, YAN Erhu, YUAN Haijiao, et al. Interlayer bonding performance of glass fiber rubber asphalt macadam seal coat on asphalt pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39(sup 2): 1-9.
- [15] 李东彪, 王国忠. 橡胶颗粒沥青混合料的性能[J]. 合成橡胶工业, 2014, 37(3): 216-218.
- LI Dongbiao, WANG Guozhong. Performances of granulated crumb rubber asphalt mixture[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2014, 37(3): 216-218.
- [16] 余苗, 赵晓宁, 陈海峰, 等. 橡胶颗粒改性沥青混合料黏弹性研究[J]. 公路交通科技, 2023, 40(2): 1-7.
- YU Miao, ZHAO Xiaoning, CHEN Haifeng, et al. Study on viscoelasticity of crumb rubber modified asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(2): 1-7.
- [17] POURHASSAN A, GHENI A A, ELGAWADY M. Effect of vehicle speed and weight on raveling of chip seal constructed using mineral and tire derived aggregate[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2024, 2678(3): 422-433.
- [18] 孟会林. 界面改性橡胶颗粒沥青混合料路用性能研究[J]. 石油沥青, 2015, 29(4): 35-39.
- MENG Huilin. Study on pavement performance of interfacial modified crumb rubber asphalt mixture[J]. Petroleum Asphalt, 2015, 29(4): 35-39.
- [19] 董瑞琨, 戚昌鹏, 郑凯军, 等. 高温裂解胶粉改性沥青的低温性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(10): 32-38.
- DONG Ruikun, QI Changpeng, ZHENG Kaijun, et al. Test on low-temperature performance for high-temperature pyrolytic rubber modified asphalt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(10): 32-38.
- [20] LEE J S, SHIELDS T, AHN H. Performance evaluation of seal coat materials and designs[R]. Indiana: Purdue University, Joint Transportation Research Program, 2011.
- [21] 章治. 超粘精罩面用于沥青路面预防性养护的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- ZHANG Zhi. Study on adhesive wearing surface for preventive maintenance of asphalt pavement[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [22] 西安公路研究院, 陕西省公路局. 同步碎石封层施工技术规范: DB61/T 914—2014[S]. 西安: 陕西省质量技术监督局 2014.
- Xi'an Highway Research Institute, Shaanxi Provincial Highway Bureau. Technique specifications for construction of synchronous pavement surface dressing: DB 61/T 914—2014[S]. Xi'an: Bureau of Quality and Technical Supervision, 2014.
- [23] RAHMAN F, ISLAM M S, MUSTY H, et al. Aggregate retention in chip seal[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2267(1): 56-64.
- [24] 吴凡, 王国忠, 李强, 等. 路面纹理扫描及宏观微观纹理分离[J]. 山西建筑, 2021, 47(2): 119-122.
- WU Fan, WANG Guozhong, LI Qiang, et al. Scanning of pavement texture and separation of macro and micro texture[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(2): 119-122.
- [25] 朱其涛. 高性能碎石封层中橡胶颗粒掺量及预裹覆沥青用量对石料流动性的影响[J]. 石油沥青, 2019, 33(2): 10-13, 47.
- ZHU Qitao. Effect of rubber particles content and pre-wrapped asphalt content on the mobility of high performance crushed stone seal[J]. Petroleum Asphalt, 2019, 33(2): 10-13, 47.
- [26] GHENI A A, ABDELKARIM O I, ABDULAZEEZ M M, et al. Texture and design of green chip seal using recycled crumb rubber aggregate[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 1084-1101.