

# 废旧聚氨酯混凝土掺量对再生混合料路用性能的影响

徐世法<sup>1</sup>, 张子谦<sup>1</sup>, 毋虹亮<sup>1</sup>, 郭倩芸<sup>1</sup>, 马昊天<sup>2</sup>, 韩昊岳<sup>3</sup>

(1. 北京建筑大学土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京市南水北调干线管理处, 北京 100195;  
3. 民航机场规划设计研究总院有限公司, 北京 100101)

**摘要:**为了研究废旧聚氨酯混凝土(RPC)的再生技术,本文提出了RPC室内模拟制备方法,并以聚氨酯为胶结料配制了七种RPC掺量的聚氨酯再生混合料(PRM),研究了聚氨酯与RPC界面的黏结性能和RPC掺量对PRM路用性能及耐久性能的影响,建立了PRM路用性能及耐久性能随RPC掺量变化的预测模型。结果表明,RPC满足规范中对集料的相关技术要求,其洛杉矶磨耗损失、软石含量、砂当量与棱角性高于石灰岩,压碎值与表观密度低于石灰岩。聚氨酯与RPC界面的黏结性能优越,随着RPC掺量的增加,PRM的路用性能及耐久性能呈下降趋势;相同RPC掺量下,随着冻融循环次数和老化时间的增加,PRM的劈裂强度逐渐降低并趋于稳定;随着RPC掺量的增加,PRM的劈裂强度随着冻融循环次数和老化时间的增加而下降的幅度更大。

**关键词:**废旧聚氨酯混凝土; 聚氨酯再生混合料; 黏结性能; 性能影响; 预测模型

中图分类号:U414

文献标志码:A

文章编号:1001-1625(2024)03-1162-10

## Influence of Content of Reclaimed Polyurethane Concrete on Pavement Performance of Recycled Mixture

XU Shifa<sup>1</sup>, ZHANG Ziqian<sup>1</sup>, WU Hongliang<sup>1</sup>, GUO Qianyun<sup>1</sup>, MA Haotian<sup>2</sup>, HAN Haoyue<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China;  
2. Beijing South-to-North Water Transfer Trunk Line Administration, Beijing 100195, China;  
3. China Airport Planning & Design Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China)

**Abstract:** The recycling of reclaimed polyurethane concrete (RPC) has not been explored yet. Therefore, this paper proposes an indoor simulation preparation method of RPC. Polyurethane recycled mixture (PRM) with 7 kinds of RPC content was prepared with polyurethane as binder. The bonding properties of polyurethane and RPC interface and the influence of RPC content on the road performance and durability of PRM were studied, and the prediction model of PRM road performance and durability with RPC content was established. The results show that RPC meets the relevant technical requirements of the specification for aggregates. The Los Angeles wear loss, soft stone content, sand equivalent and angularity are higher than those of limestone, and the crushing value and apparent density are lower than those of limestone. The bonding performance of the interface between polyurethane and RPC is superior; with the increase of RPC content, the road performance and durability of PRM show a downward trend. Under the same RPC content, splitting strength of PRM gradually decreases and tends to be stable with the increase of freeze-thaw cycles and aging time. With the increase of RPC content, the splitting strength of PRM decreases more significantly with the increase of freeze-thaw cycles and aging time.

**Key words:** reclaimed polyurethane concrete; polyurethane recycled mixture; bonding property; performance impact; prediction model

收稿日期:2023-08-30;修订日期:2023-10-09

基金项目:国家重点研发计划课题(2022YFB2601900);国家自然科学基金(U2233210,51978034);北京学者基金(No.067);北京自然科学基金会和北京市教委(KZ202110016020)

作者简介:徐世法(1993—),男,教授。主要从事路面材料与结构等方面的研究。E-mail:xu-sf@126.com

通信作者:郭倩芸,硕士研究生。E-mail:Gqyy199@163.com

## 0 引言

目前,传统的路面铺装材料主要为沥青基材料,由于沥青具有高温易软化、低温易脆裂、遇水易松散等特点,沥青路面铺装层易产生坑槽、裂缝、推移、脱层等早期病害,严重影响道路的使用寿命。

近年来,耐久性能良好的高分子聚合物材料在道路材料及建筑材料等领域的应用受到越来越多学者的关注。钟科等<sup>[1]</sup>研究了单组分聚氨酯多孔弹性混合料的固化及力学特性,结果表明,聚氨酯多孔弹性混合料的完全固化时间为4 d,具有良好的路用性能。李添帅等<sup>[2]</sup>发明了一种高性能聚氨酯透水混合料,并探究了其与多孔沥青混合料的差异性,发现聚氨酯透水混合料具有出色的力学性能和功能特性。Sun等<sup>[3-4]</sup>开发了一种常温拌和的高性能聚氨酯混合料,它的高温稳定性和低温抗裂性分别约为沥青混合料的7倍和2倍,并且具有良好的长期抗水损伤性能。Ai等<sup>[5]</sup>研究了骨料的形状和分布对聚氨酯混凝土破坏行为的影响,结果表明,骨料形状对聚氨酯混合料抗拉强度有显著影响,而对弹性模量没有影响。以上研究表明,聚氨酯混凝土具有优异的性能及耐久性,但大多仅停留在实验室性能研究阶段,在实体工程中应用较少。

徐世法课题组<sup>[6-9]</sup>选用反应活性适宜的多异氰酸酯及不结晶的聚醚多元醇软段,通过调控聚氨酯树脂分子量,开发了一种以高分子聚氨酯全面替代沥青作为胶结料的新型冷拌冷铺道路铺装材料。该材料高温稳定性相比于环氧沥青混凝土提高4倍以上,低温抗裂性相比于浇筑式沥青混凝土提高4倍以上,疲劳性能相比于环氧沥青混凝土提高6倍以上,已被应用于北京市房山区务滋村大桥、昌平区西关环岛等多项实体工程,并无废旧聚氨酯混凝土(reclaimed polyurethane concrete, RPC)产生。但后续聚氨酯混凝土路面在服役期间会产生大量废旧料,如何对这些废旧料进行再生利用处理,避免造成资源的浪费,是道路研究人员亟须解决的难题。因此,对聚氨酯混凝土在服役期间产生的废旧料的再利用问题进行前期探索和评价至关重要。

目前,在路面材料再生领域,有部分学者将聚合物作为再生混凝土的改性剂或胶结料进行应用,但对RPC铺装材料再生的相关研究尚较匮乏。为此,本文针对徐世法课题组所研发的聚氨酯混凝土进行再生利用研究,即利用聚氨酯作为胶结料对室内模拟制备的RPC进行再生利用,并对不同RPC掺量的再生混合料路用性能及耐久性能进行评价,以期为后续产生的RPC再生利用提供参考和指导作用。

## 1 RPC的制备及性能评价

### 1.1 RPC制备方法

首先,将成型的聚氨酯混凝土放置在紫外光强为 $160 \text{ W/m}^2$ 、温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的紫外老化箱中老化处理8周,以模拟环境条件对聚氨酯混凝土性能的长期影响;其次,将老化完毕后的聚氨酯混凝土进行破碎处理得到室内模拟制备的RPC;最后,将制备出的RPC进行筛分处理,根据粒径 $d$ 的大小分为 $[10, 15) \text{ mm}$ 、 $[5, 10) \text{ mm}$ 和 $[0, 5) \text{ mm}$ 三档。

经老化处理后的RPC表面的聚氨酯颜色由黑色变为灰色,质感更硬、更脆。

### 1.2 RPC性能评价

参考《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)<sup>[10]</sup>中有关集料性质的指标、试验方法和相应的技术要求,对RPC中的集料进行筛分和性能测试,并与石灰岩集料对比,RPC与石灰岩粗集料的性能测试结果见表1,RPC与石灰岩细集料的性能测试结果见表2。

表1 RPC与石灰岩粗集料的性能测试结果

Table 1 Performance test results of RPC and limestone coarse aggregate

Index	Test result		Technical requirement	Test method
	RPC	Limestone		
Los angeles abrasion loss/%	18.3	16.7	$\leq 28$	JTG E42/T0317
Crushing value/%	8.1	17.5	$\leq 26$	JTG E42/T0316
Content of soft stone/%	2.6	0.8	$\leq 3$	JTG E42/T0320
Apparent specific gravity/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.77	2.83	$\geq 2.60$	JTG E42/T0308

表2 RPC与石灰岩细集料的性能测试结果

Table 2 Performance test results of RPC and limestone fine aggregate

Index	Test result		Technical requirement	Test method
	RPC	Limestone		
Angularity/s	48	43	$\geq 30$	JTG E42/T0345
Sand equivalent/%	68	66	$\geq 60$	JTG E42/T0334
Apparent specific gravity/( $g \cdot cm^{-3}$ )	2.74	2.78	$\geq 2.50$	JTG E42/T0308

由表1和表2性能测试结果可知, RPC的各项性能测试结果均能够满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)<sup>[11]</sup>的要求,但RPC的洛杉矶磨耗损失、软石含量、砂当量与棱角性高于新集料,压碎值与表观密度低于新集料。这是由于RPC表面聚氨酯膜的存在使得其密度、承受荷载能力及抗磨损能力等刚性与耐磨损性能方面弱于新集料;表面粗糙度、形变恢复能力等柔韧性与黏附性能方面优于新集料。

由此可见, RPC可替代对应粒径的骨料应用于聚氨酯再生混凝土中。

## 2 聚氨酯再生混合料制备

### 2.1 原材料及性能

本文选用的胶黏剂为徐世法教授课题组自主研发的单组分聚氨酯材料,各性能测试结果见表3,均满足《聚醚型聚氨酯混凝土路面铺装设计与施工技术规范》(DB11/T 2008—2022)<sup>[12]</sup>的要求。

表3 聚氨酯胶黏剂性能测试结果

Table 3 Performance test results of polyurethane binder

Index	Technical requirement	Test result	Test method
Density/( $g \cdot cm^{-3}$ )	—	1.07	GB/T 4472—2011
Tensile strength (25 °C)/MPa	$\geq 2.0$	2.7	GB/T 16777—2008
Elongation ratio (25 °C)/%	$\geq 150$	165	GB/T 16777—2008
Table dry time (25 °C)/h	0.5~4.0	1.8	GB/T 16777—2008
Hard dry time (25 °C)/h	8.0~25.0	16.2	GB/T 16777—2008
Water impermeability (0.3 MPa, 24 h)	Impermeable	Impermeable	GB/T 16777—2008
Water absorption/%	$< 4.0$	2.5	GB/T 1034—2008
Cohesive strength (25 °C)/MPa	$\geq 1.0$	2.8	T/CECS GK58—01;2020
Kinematic viscosity (25 °C)/(Pa · s)	$\leq 3.0$	2.6	JTG E20/T0619

本文使用的催化剂为环烷酸锌,可通过调整其掺量改变聚氨酯混合料的固化反应时机,但对材料的本身性能无任何影响。

本文采用的集料为石灰岩和RPC,性能测试结果见表1和表2,各项性能均满足规范要求。石灰岩和RPC的粒径分布曲线见图1。

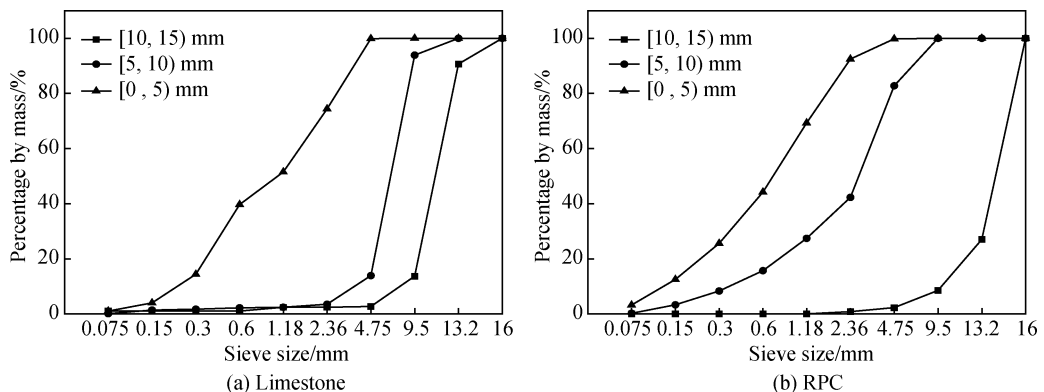


图1 集料粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curves of aggregates

## 2.2 级配设计

聚氨酯再生混合料 (polyurethane recycled mixture, PRM) 参考 AC-13 的级配, 选用 0%、25%、30%、35%、40%、45% 及 50% (质量分数) 七种 RPC 掺量, 以  $m(d = [10, 15) \text{ mm}) : m(d = [5, 10) \text{ mm}) : m(d = [0, 5) \text{ mm}) = 1 : 2 : 2$  作为三档 RPC 的掺配比例对 PRM 进行混合料级配设计, 不同 RPC 掺量的 PRM 级配设计见表 4。

表 4 不同 RPC 掺量的 PRM 级配设计

Table 4 PRM gradation design with different RPC content

RPC content/%	RPC content of different size group/%			Limestone content of different size group/%			Filler content/%
	[10, 15) mm	[5, 10) mm	[0, 5) mm	[10, 15) mm	[5, 10) mm	[0, 5) mm	
0	0	0	0	25	25	44	6
25	5	10	10	25	22	22	6
30	6	12	12	24	20	20	6
35	7	14	14	25	20	14	6
40	8	16	16	19	25	10	6
45	9	18	18	20	20	9	6
50	10	20	20	18	16	10	6

注: % 为质量分数。

## 2.3 PRM 的制备及最佳胶石比的确定

参照课题组前期研究成果及聚氨酯混凝土相关标准规范, 以 6.5% 作为胶石比中值, 0.5% 作为差值选取 5.5%、6.0%、6.5%、7.0% 和 7.5% 五种胶石比, 通过马歇尔设计方法确定不同 RPC 代替新矿料比例条件下的 PRM 的最佳胶石比。

为了减小试验误差, 严格把控马歇尔试件的成型和养生方式。首先将 RPC 和石灰岩放置于 110 °C 烘箱内进行烘干处理, 待冷却后倒入拌和锅中在常温环境 (25 °C) 下进行机械拌和, 先将 RPC 和新集料拌和 90 s 后, 再加入含催化剂的聚氨酯拌和 90 s, 最后加入矿粉拌和 90 s。拌和完成后结合环境温度及湿度选择适当的静置时间 (在温度 25 °C、相对湿度 70% 及催化剂含量 1% (质量分数) 条件下静置 3~4 h), 待聚氨酯形成一定强度后进行击实成型。将成型试件在常温养生 24 h, 然后置于恒温恒湿箱 (温度 (60 ± 5) °C、相对湿度 (30 ± 5)%) 中加速养生 48 h, 最后常温静置不少于 24 h, 对养生完毕后的试件进行各项指标检测。

根据检测得到 PRM 的物理体积及力学性能并结合《聚醚型聚氨酯混凝土路面铺装设计与施工技术规范》(DB11/T 2008—2022) 的技术要求确定 PRM 最佳胶石比。PRM 在 0%、25%、30%、35%、40%、45% 和 50% 七种 RPC 掺量下的最佳胶石比分别是 7.0%、6.8%、6.6%、6.5%、6.4%、6.4% 和 6.2%, 随着 RPC 掺量的增加, PRM 的最佳胶结料用量有所下降。

## 3 试验方案

### 3.1 聚氨酯与 RPC 界面黏结性能测试

为探究 PRM 中聚氨酯与不同集料界面的黏结性能, 以拉脱强度和黏附性能作为评价界面黏结性能的指标, 测试了聚氨酯与 RPC、RPC 中老化聚氨酯与石灰岩、聚氨酯与石灰岩的界面黏结性能。其中, RPC 中老化聚氨酯与石灰岩界面黏结性能是将聚氨酯均匀涂抹在石灰岩片上, 老化处理后通过黏结性能试验模拟得到。

#### 3.1.1 拉脱强度试验

拉脱强度可以评估胶结料与集料界面的内聚强度和附着力, 拉脱强度越大, 胶结料与集料间黏结效果越好。黏附功可以反映液态物质与固态物质之间的黏附效果, 黏附功越大, 液态物质越容易与固态物质结合, 单位面积的接触效果越好, 则胶结料与骨料之间的黏附性越好。

拉脱强度试验参考美国 *Standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers* (ASTM D4541—2022) 进行, 试验仪器选用“CONTROLS”生产的型号为 58-C0215 的拉脱强度数字测试仪, 对不同组间的界面拉脱强度进行测试。首先将聚氨酯胶结料涂抹于石灰岩或 RPC, 将其放置在 60 °C 烘箱中养生 48 h, 待养生完毕后, 将拉拔装置一面涂抹上双组分强力胶后压覆在已养生完毕涂抹了聚氨酯胶结料石灰岩或 RPC 上, 放置 6 h 以上进行养生, 待全干后进行拉脱试验, 拉脱试验装置示意图见图 2。

### 3.1.2 黏附性能试验

选用表面能理论作为理论基础,对聚氨酯与 RPC 和新集料之间的黏附性进行测试评价。选用接触角试验对聚氨酯、SBS 改性沥青、石灰岩集料、老化聚氨酯的相关表面能参数进行测定。试验采用“DSA100”接触角测量仪,滴液选择甲酰胺、丙三醇和蒸馏水三种表面自由能较大的试剂,通过计算得到各材料的表面能及不同界面间的黏附功。表面能各分量之间的关系式见式(1),黏附功的计算公式见式(2)。

$$\gamma = \gamma_d + \gamma_p \quad (1)$$

$$W_a = 2 \sqrt{\gamma_s^d \gamma_l^d} + 2 \sqrt{\gamma_s^p \gamma_l^p} \quad (2)$$

式中: $W_a$  为界面黏附功,  $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\gamma$ 、 $\gamma_d$  和  $\gamma_p$  分别为表面自由能及其色散分量和极性分量,  $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\gamma_s^d$  和  $\gamma_s^p$  分别表示固态物质的表面能极性分量与色散分量,  $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\gamma_l^d$  和  $\gamma_l^p$  分别表示液态物质的表面能极性分量与色散分量,  $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 3.2 PRM 路用性能试验

RPC 掺量对 PRM 的路用性能影响试验主要分为高温性能、低温性能及水稳定性试验,本文研究采用车辙试验测试高温性能,采用低温小梁弯曲试验测试低温性能,水稳定性采用冻融劈裂试验分析,试验方法参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)<sup>[13]</sup>进行。

### 3.3 PRM 耐久性能试验

#### 3.3.1 抗疲劳性能试验

选择四点弯曲疲劳的方法对不同 RPC 掺量的 PRM 疲劳寿命进行测试,试验方法按照规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E 20—2011)中 T0739 进行测试,采用四点弯曲疲劳试验机,试验条件如下:试验温度为 15 °C,加载频率为 10 Hz,加载方式为正弦波式,应变加载水平为 1 200  $\mu\epsilon$ ,选择 RPC 试件到达劲度模量初始值的一半时的加载次数为极限寿命,试件尺寸为 380.0 mm × 63.5 mm × 50.0 mm。

#### 3.3.2 耐水损害试验

冻融循环试验基于《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)冻融劈裂试验和文献[14]中冻融循环的方法并进行了适当修改,具体操作为:先将试件置于(-18 ± 0.5) °C 下冰冻 12 h 后再放至(60 ± 0.5) °C 恒温水槽中解冻 12 h 作为一次循环,重复循环六次,对每次循环后不同 PRC 掺量的 PRM 试件劈裂强度进行记录,并作为评价指标。

#### 3.3.3 耐光热老化试验

选用光热老化试验对 PRM 的耐老化性能进行研究,选用紫外线加速耐候试验机对 PRM 试件同时进行光氧老化及热氧老化,紫外光强为 160  $\text{W}/\text{m}^2$ ,温度为 60 °C,总老化时间为 8 周,并以 2 周为一个阶段,选取劈裂强度作为评价指标对不同掺量下的 PRM 耐老化能力进行测试评价。

### 3.4 性能预测模型的建立

为分析 RPC 掺量对 PRM 路用性能及耐久性能的影响,运用 SPSS 软件回归分析,建立 PRM 路用性能与 RPC 掺量的拟合方程和 PRM 耐久性能与 PRC 掺量和老化周期的拟合方程。

## 4 结果与讨论

### 4.1 聚氨酯与 RPC 界面黏结性能试验

#### 4.1.1 拉脱强度测试

各类型界面拉脱强度测试结果见表 5。

由表 5 可知,聚氨酯与不同类型集料的界面拉脱强度均大于 3.5 MPa,是沥青与石灰岩界面拉脱强度 3 倍以上,说明聚氨酯与 RPC 和集料之间黏结性能表现优越。但聚氨酯作为胶结料时的界面拉脱强度中,聚氨酯与

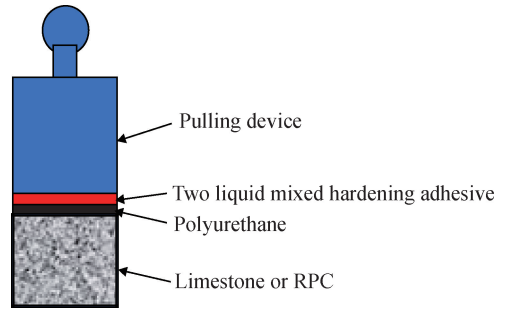


图2 拉脱试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pull-off test device

石灰岩界面拉脱强度最高,为 4.564 MPa,其次是聚氨酯-RPC 界面拉脱强度,为 4.045 MPa, RPC 中老化聚氨酯与石灰岩界面拉脱强度最低。

表 5 各类型界面拉脱强度测试结果

Table 5 Test results of pull-off strength of various types of interfaces

Interface type	Interface pull-out strength/MPa
SBS modified asphalt and limestone	1.264
Aged polyurethane and limestone	3.917
Polyurethane and RPC	4.045
Polyurethane and limestone	4.564

4.1.2 黏附性能测试

各种材料表面能及分量测试结果见表 6,不同类型界面黏附功计算结果见表 7。

表 6 各种材料表面能及分量

Table 6 Surface energy and component of various materials

Material type	Surface energy and component/( $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )		
	Surface energy $\gamma$	Dispersion component $\gamma^d$	Polarity component $\gamma^p$
Polyurethane	71.05	21.68	49.37
SBS modified asphalt	26.31	5.77	20.54
Aged polyurethane	62.94	19.33	43.61
Limestone	36.29	10.18	26.11

表 7 不同类型界面黏附功

Table 7 Adhesion work of different interface types

Interface type	Asphalt-limestone	Aged polyurethane-limestone	Polyurethane-aged polyurethane	Polyurethane-limestone
Adhesion work/( $\text{mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ )	61.64	95.54	133.74	101.52

由表 7 可知,聚氨酯与不同材料界面的黏附功是沥青与石灰岩界面黏附功的 1.5 倍以上,其中聚氨酯-老化聚氨酯界面最高,为  $133.74 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$ ,其次是聚氨酯-石灰岩界面, RPC 中老化聚氨酯-石灰岩界面最低。

综上所述,聚氨酯作为胶结料与不同材料间的界面黏结强度均远高于沥青-石灰岩的界面黏附强度,代表聚氨酯与石灰岩和 RPC 间界面黏结强度优越,但老化聚氨酯与石灰岩间的界面黏结强度低于聚氨酯与 RPC 界面和聚氨酯与石灰岩界面黏结强度。这可能由于聚氨酯高温和紫外光耦合条件下,内部高分子链发生降解反应,从而导致聚氨酯黏结性能减弱<sup>[15]</sup>。

4.2 RPC 掺量对 PRM 路用性能的影响

不同 RPC 掺量 PRM 的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性路用性能见图 3。

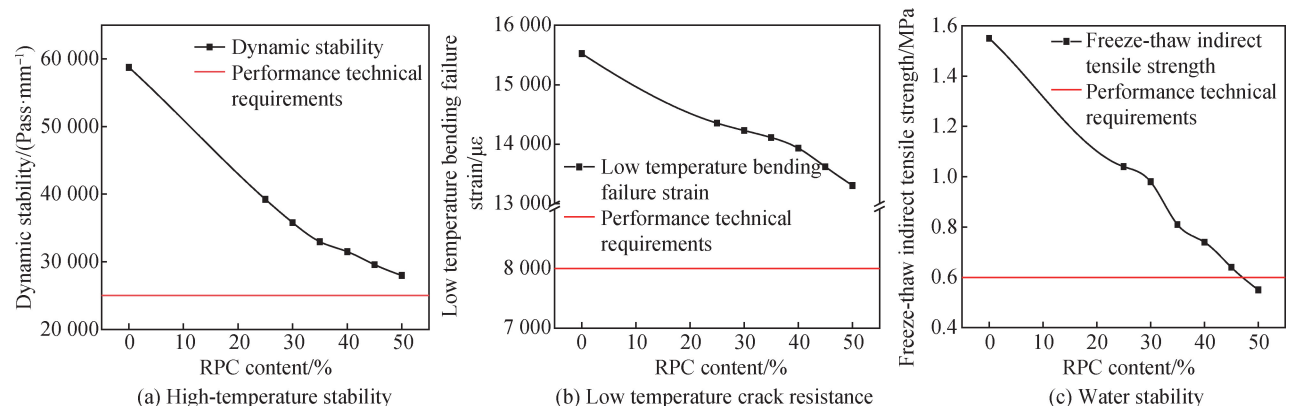


图 3 不同 RPC 掺量下 PRM 路用性能变化

Fig. 3 Change of road performance of PRM with different RPC content

由图3可知,聚氨酯作为胶结料对RPC进行再生时,RPC掺量为25%、30%、35%、40%和45%的PRM各项路用性能均符合规范要求,RPC掺量为50%的PRM水稳定性性能低于规范值。但RPC的掺加使PRM的高温稳定性、低温抗裂性和抗水损害性大幅下降,并随着RPC掺量的增多,PRM的高温稳定性、低温抗裂性和抗水损害性均缓慢下降。

分析认为,由于PRM的最佳胶石比降低,聚氨酯用量降低,粒料间可能出现胶结料裹覆不均或无胶结料的情况,从而导致PRM的性能随着RPC掺量的增加而降低;由于RPC相较于新集料刚度较差,在受荷载作用时易产生形变,从而导致PRM的高温稳定性随着RPC掺量的增加而降低;由于RPC中老化聚氨酯-石灰岩界面拉脱强度低于聚氨酯-老化聚氨酯界面和聚氨酯-石灰岩界面拉脱强度,在进行低温小梁试验时,老化聚氨酯会先与石灰岩脱开,从而导致PRM的低温抗拉强度随着RPC掺量的增加而降低;由于胶结料与骨料之间黏附性能的反应水对胶结料的侵蚀剥落作用,黏附功越高,PRM的抗水损害能力越强,而RPC中老化聚氨酯-石灰岩界面的黏附功最低,从而导致PRM的水稳性随着RPC的增加而逐步降低。

#### 4.3 RPC掺量对PRM耐久性能的影响

通过对不同RPC掺量PRM路用性能研究可知,RPC掺量为50%的PRM路用性能不满足规范要求,因此本文仅对RPC掺量为0%、25%、30%、35%、40%和45%的PRM耐久性能进行了研究。

##### 4.3.1 抗疲劳性能

不同RPC掺量PRM疲劳性能测试结果见表8。

表8 不同RPC掺量PRM疲劳性能测试结果

Table 8 Fatigue performance test results of PRM with different RPC content

RPC content/%	0	25	30	35	40	45
Initial stiffness modulus/MPa	704	649	630	609	584	575
Fatigue life/( $10^4$ cycles)	>80	>80	>80	>80	>80	>80

由表8可知,各RPC掺量PRM的疲劳寿命均大于80万次,表明PRM具有较好的抗疲劳性能,这是由于聚氨酯胶结料本身能够增强混合料的刚度和柔韧性,从而具有较好的荷载疲劳能力。但由于RPC的掺加使PRM最佳胶石比降低,聚氨酯胶结料用量减少,导致PRM的初始劲度模量随着RPC掺量的增加在一定程度上降低。

##### 4.3.2 抗水损害性能

不同RPC掺量PRM多次冻融循环后劈裂强度测试结果见表9。

表9 不同RPC掺量PRM多次冻融循环后劈裂强度测试结果

Table 9 Test results of splitting strength after freeze-thaw cycles of PRM with different RPC content

RPC content/%	Splitting strength/MPa						
	0 cycle	1 cycle	2 cycles	3 cycles	4 cycles	5 cycles	6 cycles
0	3.57	1.55	1.47	1.35	1.33	1.34	1.32
25	2.26	1.04	0.96	0.95	0.96	0.95	0.95
30	2.15	0.98	0.92	0.81	0.79	0.78	0.77
35	1.78	0.81	0.77	0.76	0.75	0.75	0.74
40	1.68	0.74	0.70	0.69	0.68	0.68	0.67
45	1.51	0.64	0.60	0.57	0.56	0.56	0.54

由表9可知,RPC的加入使混合料的剩余劈裂强度下降,随着冻融循环次数的增加,不同旧料掺量的聚氨酯再生混合料试件剩余劈裂强度下降,在冻融循环次数为4次后不同RPC掺量PRM试件剩余劈裂强度趋于稳定。因为RPC中老化聚氨酯与石灰岩黏结强度低于新聚氨酯和石灰岩黏结强度,所以RPC的加入使劈裂强度下降。

##### 4.3.3 抗光热老化性能

不同RPC掺量PRM光热老化后的劈裂强度测试结果见表10。

表 10 不同 RPC 掺量 PRM 光热老化后的劈裂强度测试结果

Table 10 Splitting strength test results of PRM with different RPC content after photothermal aging

RPC content/%	Splitting strength/MPa				
	0 week	2 weeks	4 weeks	6 weeks	8 weeks
0	3.57	3.34	3.26	3.20	3.18
25	2.26	2.08	2.01	1.98	1.97
30	2.15	2.01	1.95	1.93	1.92
35	1.78	1.64	1.58	1.53	1.53
40	1.68	1.56	1.50	1.49	1.48
45	1.51	1.42	1.37	1.34	1.33

由表 10 可知,随着紫外老化时间的延长,各掺量试件的劈裂强度均下降,且均在 4 周后趋于平缓。0% RPC 掺量的聚氨酯混合料紫外老化处理 8 周后劈裂强度最多降低 10.9%,不同 RPC 掺量的 PRM 在光热老化 4 周后,PRM 的劈裂强度与上一老化阶段所测数值相比降幅均在 5% 以内。室内加速老化 2 周内的各 RPC 掺量聚氨酯混合料试件劈裂强度均下降较快,且随着老化时间的不断增加,聚氨酯混合料外层部分到达老化的终值,紫外光难以渗透至混合料内部,PRM 劈裂强度也逐渐趋于稳定。

#### 4.4 预测模型

##### 4.4.1 预测模型的建立

不同 RPC 掺量 PRM 的路用性能及耐久性能预测方程见表 11,不同 RPC 掺量 PRM 的路用性能及耐久性能预测模型见图 4。

表 11 不同 RPC 掺量 PRM 的路用性能及耐久性能预测方程

Table 11 Prediction equation of road performance and durability of PRM with different RPC content

Index	Prediction equation	R <sup>2</sup>
High-temperature stability	$y_1 = -639.596x + 56\ 886.174$	0.950 2
Low temperature crack resistance	$y_2 = -42.238x + 15\ 512.239$	0.984 7
Water stability	$y_3 = -0.020\ 1x + 1.55$	0.987 3
Anti-fatigue performance	$y_4 = -2.872x + 711.77$	0.922 6
Water damage resistance	$y_5 = -0.032x_1^3 + 0.363x_1^2 - 1.241x_1 + 0.000\ 002x^3 - 0.02x + 2.728$	0.859 4
Light-heat aged resistance	$y_6 = -0.000\ 66x_2^2 + 0.013\ 452x_2^2 - 0.097\ 48x_2 + 0.000\ 007x^3 - 0.000\ 244x^2 - 0.046\ 797x + 3.481\ 781$	0.989 2

注: $x$  为 RPC 掺量, $x_1$  为冻融循环次数, $x_2$  为老化周期, $y_1$  为动稳定度, $y_2$  为低温弯曲破坏应变, $y_3$  为冻融劈裂抗拉强度, $y_4$  为初始劲度模量, $y_5$  为冻融循环后劈裂抗拉强度, $y_6$  为劈裂强度。

由表 11 可知,不同 RPC 掺量下的 PRM 路用性能及耐久性能预测模型的 R<sup>2</sup> 均大于 0.85 且接近于 1,代表模型拟合精度较高。由图 4 可知,PRM 路用性能及耐久性能与 RPC 掺量呈负相关趋势,代表 RPC 的加入会使得 PRM 的路用性能及耐久性能降低,这是由于 RPC 刚度小于石灰岩且 RPC 上的老化聚氨酯与石灰岩黏结强度较低所造成的。

##### 4.4.2 预测模型验证

为验证上述模型是否准确,对 10% RPC 掺量 PRM 路用性能及耐久性能实测数据进行检验,其中耐水损害性能选用冻融循环第 3 次与第 6 次后的实测数据,耐光热老化性能选用老化第 4 周与第 8 周实测数据,检验结果见表 12。从检验结果可以看出,不同 RPC 掺量下的 PRM 路用性能及耐久性能预测模型较为准确,能够实现对 PRM 路用性能及耐久性能的预测。

表 12 不同 RPC 掺量 PRM 路用性能及耐久性能预测模型检验结果

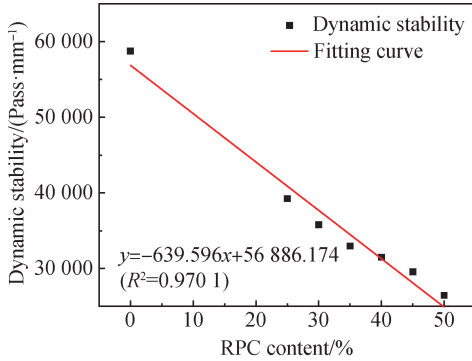
Table 12 Test results of PRM road performance and durability prediction model with different RPC content

Index	Working condition		Measured value	Predicted value	Error value/%
	$x$ /%	$x_1$ $x_2$			
High-temperature stability/(Pass · mm <sup>-1</sup> )	10		49 965.00	50 490.00	1.04
Low temperature crack resistance/με	10		15 680.00	15 089.00	-3.91
Water stability/MPa	10		1.39	1.35	-3.04

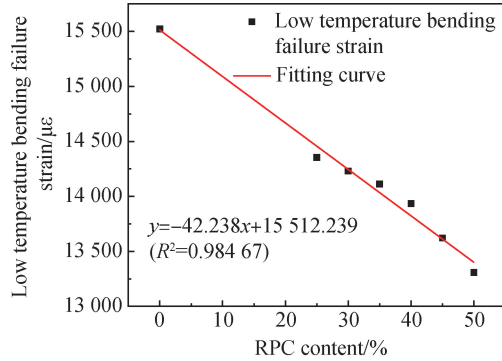


续表

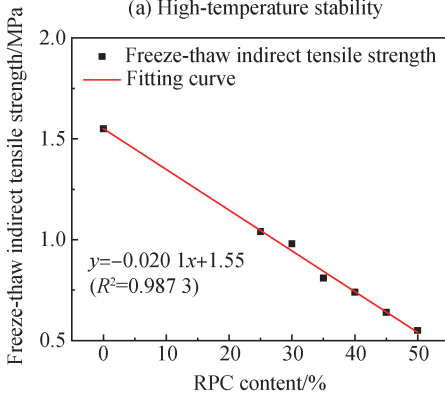
Index	Working condition			Measured value	Predicted value	Error value/%
	x/%	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>			
Anti-fatigue performance/MPa	10			687.00	683.00	-0.58
Water damage resistance/MPa	10	3		1.25	1.21	-3.31
Water damage resistance/MPa	10	6		1.22	1.24	1.61
Light-heat aged resistance/MPa	10		4	2.96	2.78	-6.49
Light-heat aged resistance/MPa	10		8	2.84	2.74	-3.67



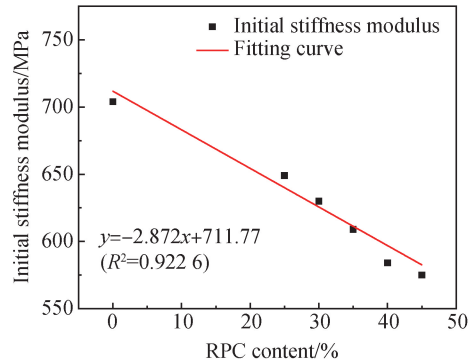
(a) High-temperature stability



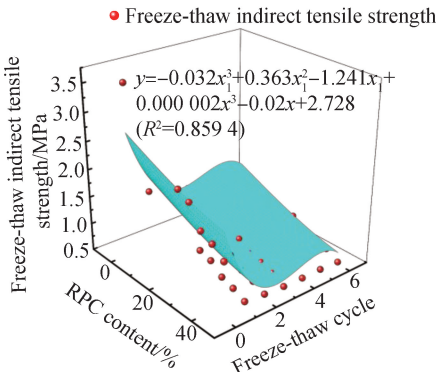
(b) Low temperature crack resistance



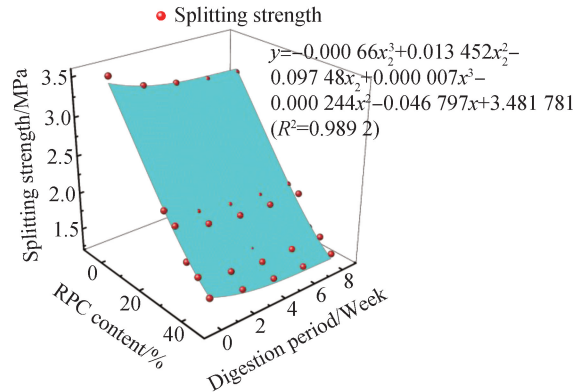
(c) Water stability



(d) Anti-fatigue performance



(e) Water damage resistance



(f) Light-heat aged resistance

图 4 不同 RPC 掺量 PRM 路用性能及耐久性能预测模型

Fig. 4 Prediction model of road performance and durability of PRM with different RPC content

## 5 结 论

1) 本文提出了一种 RPC 的室内制备方法,且 RPC 各档料的性能均能满足规范中对骨料的技术要求。对不同 RPC 掺量的 PRM 进行配合比设计,得到 7 种 RPC 掺量下的最佳胶石比,随着 RPC 掺量增加,聚氨酯

混合料的最佳胶结料用量有所下降。

2) 聚氨酯与 RPC 界面黏结性能优越,拉脱强度为 4.045 MPa,仅次于聚氨酯与石灰岩黏结强度;黏附功为 133.74 mJ/m<sup>2</sup>,优于其他种类界面黏附性能。

3) RPC 的加入使 PRM 的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性均产生大幅下降,并随着 RPC 掺量的增加,PRM 的高温稳定性、低温抗裂性和水稳定性缓慢下降。

4) 随着 RPC 掺量的增大,PRM 初始劲度模量逐渐减小,但疲劳寿命均大于 80 万次,抗疲劳性能优越;经冻融与光热老化后 PRM 的剩余劈裂强度也呈下降趋势,但在第 4 次冻融循环和光热老化 4 周后,PRM 的剩余劈裂强度趋于稳定。

## 参 考 文 献

- [1] ZHONG K, ZHANG M L, SUN M Z, et al. Curing and mechanical property of single-component polyurethane porous elastic mixture[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2022, 38(1): 56-61.
- [2] 李添帅, 陆国阳, 王大为, 等. 高性能聚氨酯透水混合料关键性能研究[J]. 中国公路学报, 2019, 32(4): 158-169.  
LI T S, LU G Y, WANG D W, et al. Key properties of high-performance polyurethane bounded pervious mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(4): 158-169 (in Chinese).
- [3] SUN M Z, BI Y F, ZHENG M L, et al. Evaluation of a cold-mixed high-performance polyurethane mixture[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 2019: 1-12.
- [4] SUN M Z, BI Y F, ZHENG M L, et al. Performance of polyurethane mixtures with skeleton-interlocking structure[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(2): 04019358.
- [5] AI S G, TANG L Q, MAO Y Q, et al. Effect of aggregate distribution and shape on failure behavior of polyurethane polymer concrete under tension[J]. Computational Materials Science, 2013, 67: 133-139.
- [6] 石泽雄. 高性能钢桥面铺装材料开发及性能评价[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018: 25-33.  
SHI Z X. Development and performance evaluation of high performance steel bridge deck pavement materials[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018: 25-33 (in Chinese).
- [7] 巴学亮. 大孔隙高分子聚合物混合料性能研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2018: 33-48.  
BA X L. Study on properties of macroporous polymer mixture[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018: 33-48 (in Chinese).
- [8] 郭虹良. 聚合物混凝土耐久性影响因素研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2019: 16-33.  
GUO H L. Study on influencing factors of durability of polymer concrete[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019: 16-33 (in Chinese).
- [9] 王荣伟, 胡占红, 石家磊, 等. 高分子聚合物混凝土铺装材料的开发及路用性能检测评价[J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35(10): 39-42.  
WANG R W, HU Z H, SHI J L, et al. Development of polymer concrete paving materials and evaluation of road performance[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35(10): 39-42 (in Chinese).
- [10] 中华人民共和国交通部. 公路工程集料试验规程; JTG E42—2005[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Test rules for aggregates in highway engineering; JTG E42—2005[S]. Beijing: People's Communications Press, 2005 (in Chinese).
- [11] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范; JTG F 40—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Ministry of Communications of the People's Republic of China. Technical specification for highway asphalt pavement construction; JTG F 40—2004[S]. Beijing: People's Communications Press, 2005 (in Chinese).
- [12] 北京市市场监督管理局. 聚醚型聚氨酯混凝土路面铺装设计与施工技术规范; DB11/T 2008—2022[S]. 北京: 人民交通出版社, 2022.  
Beijing Municipal Administration of Market Supervision. Technical code for design and construction of polyether polyurethane concrete pavement; DB11/T 2008—2022[S]. Beijing: People's Communications Press, 2022 (in Chinese).
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程; JTG E20—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test rules for asphalt and asphalt mixture in highway engineering; JTG E20—2011[S]. Beijing: People's Communications Press, 2011 (in Chinese).
- [14] 王文娟, 马芹永, 吴金荣. 不同类型沥青混凝土冻融疲劳性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(11): 2385-2388.  
WANG W J, MA Q Y, WU J R. Research on freeze-thaw fatigue performance of different types asphalt concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2013, 32(11): 2385-2388 (in Chinese).
- [15] 陆刚, 帅长庚, 杨雪, 等. 紫外老化对聚醚-MDI 型聚氨酯弹性体性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(11): 117-120 + 126.  
LU G, SHUAI C G, YANG X, et al. Effect of ultraviolet aging on properties of polyether-MDI polyurethane elastomer[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(11): 117-120 + 126 (in Chinese).