

聚氨酯混合料固化规律及路用性能研究

孙晟凯,郑茂,汤雄,刘丽,钟盛燃,司特

(四川省交通建设集团有限责任公司,四川 成都 610000)

摘要:聚氨酯混合料由聚氨酯黏结剂、橡胶颗粒和石料组成,相较于普通沥青混合料具有橡胶颗粒掺量高、空隙率大等特点。该文通过单组分聚氨酯的黏-时曲线和黏-温曲线确定了聚氨酯混合料的压实温度,基于车辙试验、三点弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和摆氏摩擦试验,验证了不同橡胶颗粒替换量下聚氨酯混合料的路用性能。研究结果表明:PU-1型聚氨酯混合料拌和温度可以基本控制在73~81℃,并且可在常温(25℃)下进行摊铺碾压;聚氨酯混合料在常温下4d后可达到完全固化状态,采用洒水法可以提高固化速度;在保证高温性能的前提下,当橡胶颗粒替换量不断提高时,聚氨酯混合料的最大弯拉应变、 R_{MSR} (残留稳定度)、 R_{TSR} (冻融劈裂强度比)和 B_{BPN} (摩擦摆值)呈线性增长,说明橡胶颗粒对聚氨酯混合料的低温性能、水稳定性和抗滑性的提高有促进作用。

关键词:道路工程;聚氨酯;橡胶颗粒;固化规律;路用性能

中图分类号:U414

文献标志码:A

Curing Law and Road Performance of Polyurethane Mixture

SUN Shengkai, ZHENG Mao, TANG Xiong, LIU Li, ZHONG Shengran, SI Te

(Sichuan Transportation Construction Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610000, China)

Abstract: Polyurethane mixture is composed of polyurethane binder, rubber particles, and stones. Compared with ordinary asphalt mixture, it has the characteristics of a higher content of rubber particles and large void ratios. This article first tested the viscosity-time curve and viscosity-temperature curve of one-component polyurethane and determined the compaction temperature of the polyurethane mixture. Based on the rutting test, three-point bending test, water immersion Marshall test, freeze-thaw splitting test, and pendulum friction test, the road performance of the polyurethane mixture under different replacement amounts of rubber particles was tested. The research results show that the mixing temperature of PU-1 polyurethane mixture can be basically controlled between 73 °C and 81 °C, and it can be spread and rolled at room temperature (25 °C); the polyurethane mixture is cured after four days at room temperature. To accelerate the curing, the water spraying method can be used; under the condition of ensuring high temperature performance, when the replacement amount of rubber particles continues to increase, the maximum flexural strain, R_{MSR} value, R_{TSR} value, and B_{BPN} value of the polyurethane mixture increase linearly. It shows that the rubber particles can promote low temperature performance, water stability, and slip resistance of the polyurethane mixture.

Keywords: road engineering; polyurethane; rubber particle; curing law; road performance

0 引言

随着海绵城市、绿色公路建设理念不断推广,道路对功能性和舒适性的要求也越来越高^[1]。具有排

水、降噪等功能的聚氨酯路面逐渐被应用到城市道路中。聚氨酯混合料由聚氨酯黏结剂、橡胶颗粒和石料拌和而成^[2],相较于普通沥青混合料,其具有空隙率大、橡胶颗粒掺量高等特点。橡胶颗粒为高分

收稿日期:2024-03-11(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51908261)

作者简介:孙晟凯,男,硕士,工程师.E-mail:932658033@qq.com

子有机材料,其本身的结构与砂石差别较大^[3]。加入橡胶会改变拌和物内部结构,从而在实质上改变了混合料的受力模式,严重影响了混合料的路用性能^[4]。国外橡胶改性拌和物通常设计成密实结构^[5]。欧洲道路科研所首次将橡胶颗粒等体积替换部分石料,与沥青充分搅拌后得到橡胶改性拌和物^[6];荷兰科研人员将橡胶颗粒先与沥青搅拌,再与砂石搅拌得到橡胶改性拌和物^[7]。这也是最早的两种不同橡胶颗粒替换的方式。中国对橡胶改性沥青混合料的研究也有很多,班午东^[8]探索橡胶沥青拌和物的服役性能,重点研究拌和物的空隙率测试方法、材料的拌和、养生与服役性能,发现橡胶颗粒的加入降低了混合料的高温稳定性;赵素艳^[9]为提高橡胶改性拌和物的使用价值,对橡胶沥青拌和物服役性能进行研究,发现添加降黏剂有效提高了橡胶改性拌和物的高温力学特性,但低温性能并不理想;张聪^[10]研究发现随着橡胶颗粒掺量增大,道路的抗滑性增高,在确保最佳油石比的情况下,橡胶沥青拌和物可以增强道路的抗滑性能。

综上所述,在现有聚氨酯混合料组成设计中,主要对橡胶沥青混合料进行设计研究,缺少对橡胶改性聚氨酯混合料综合研究,较少涉及不同橡胶颗粒替换量对聚氨酯混合料性能的影响分析^[11-12]。为此,本文先测试单组分聚氨酯的黏-时曲线和黏-温曲线,确定混合料的压实温度,再基于不同橡胶颗粒替换量的聚氨酯混合料来评价聚氨酯混合料的抗车辙能力、低温稳定性、水损害性、抗剥落性、抗滑性能。

1 原材料

1.1 聚氨酯黏结剂

在聚氨酯混合料中,聚氨酯黏结剂必须与橡胶颗粒和砂石相互结合才能够满足其服役性能,所以选取的聚氨酯黏结剂要拥有较高的黏度^[13]。此外,在路面摊铺的超弹多孔聚氨酯混合料中,不仅需要承担汽车给予的压力作用,而且遭到高温、雨水、冰雪的恶劣环境的洗礼,因此所选取的聚氨酯材料固化后强度较高^[14]。本文选择单组分聚醚性聚氨酯作为研究对象,其技术指标见表1。

1.2 集料

为确保聚氨酯混合料拥有良好的服役性能,不仅对黏结剂的选择有明确的要求,对石料的选取要

求也高。减少扁平集料的数量,严格限制针片状的数目^[15]。在常见的石料种类中,玄武岩的磨光值最大,与聚氨酯胶黏剂的吸附性好^[16]。为此,本文集料采用玄武岩,其技术指标见表2。

表1 聚氨酯技术指标

Table 1 Technical indexes of polyurethane

名称	颜色	密度/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度(25℃)/ ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	固化时 间/d	适用温 度/℃
PU-I	淡黄色	1.13	1 633	2~3	-10~60

表2 石料技术指标

Table 2 Technical index of stone

技术指标	单位	试验结果	规范要求	试验方法
压碎值	%	14	<26	T0316
磨耗值	%	15	<28	T0317
软石含量	%	1.5	<3.0	T0310
吸水率	%	1.3	<2.0	T0304
坚固性	%	10	<12	T0314

1.3 橡胶颗粒

聚氨酯混合料中的橡胶颗粒是采用替换一部分石料的方式掺入其中。其粒径大小、表面特性、力学性质等对超弹多孔聚氨酯混合料有重要的作用。为了使橡胶颗粒与混合料之间更好地融合,采用等体积替换的方法代替部分石料^[17]。本文使用的橡胶颗粒为废旧轮胎橡胶颗粒,其力学参数见表3。

表3 橡胶颗粒技术指标

Table 3 Technical index of rubber

项目	表观密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	邵尔硬 度/%	细长扁 平颗粒 含量/%	弹性模 量/MPa	含水量/ %	炭黑含 量/%
试验结果	1.15	71	4.3	11.4	0.20	27
技术要求	≤ 1.25	≥ 55	≤ 10.0	≥ 5.0	≤ 0.75	25~38

2 聚氨酯混合料固化规律研究

2.1 聚氨酯黏结剂黏度变化规律分析

不同聚氨酯黏结剂待达到完全固化所用的时间有很大的差别,通过调研可知^[18],双组分聚氨酯的固化较快,一般在1 h作用后可达到完全固化,而单组分聚氨酯的固化较为缓慢^[19]。本节采用布氏黏度试验测试聚氨酯黏结剂的固化时间,准备PU-I单组分聚醚型聚氨酯50 g,分别在30℃、40℃、50℃

3种不同温度下测试单组分聚氨酯黏结剂的黏度。在固化过程中每10 min测试1次,测试截止时间为扭矩读数超过98%的固化时间,黏-时曲线及黏-温曲线如图1、2所示。

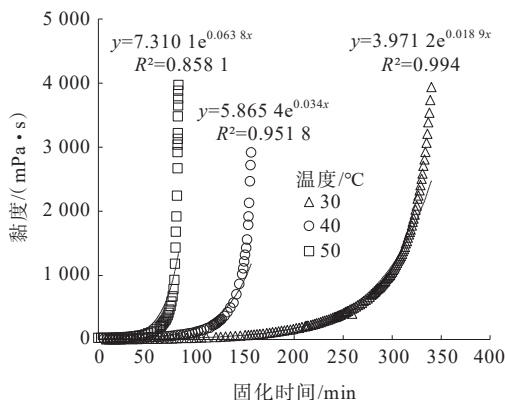


图1 聚氨酯黏结剂黏-时曲线

Figure 1 Viscosity-time curve of polyurethane binder

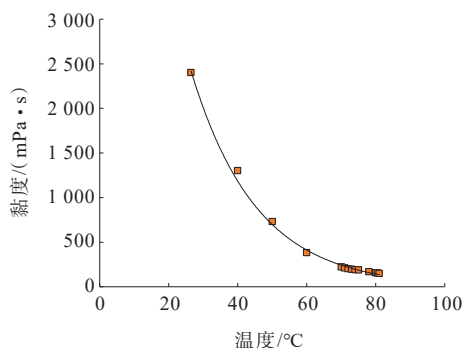


图2 聚氨酯黏结剂黏-温曲线

Figure 2 Viscosity-temperature curve of polyurethane binder

由图1可知,当室内温度为30℃时,聚氨酯黏结剂在130 min时黏度出现了变化,而且在经过270 min后黏度开始呈指数函数增长;40℃时,聚氨酯在100 min时出现黏度变化,在150 min后黏度开始迅速增长;50℃时,聚氨酯在29 min就出现了黏度变化,随后黏度立即开始增长。这说明温度对聚氨酯黏度的变化影响巨大,温度越高,聚氨酯黏结剂黏度增长越快;温度越低,黏度增长越慢。

从图2可以看出:聚氨酯黏结剂黏度大小与温度负相关。在常温时(25℃)时,PU-I聚氨酯黏度为2400 mPa·s,黏度达到150~190 mPa·s时的温度为73~81℃。这说明混合料拌和温度可以基本控制为73~81℃,并且在常温(25℃)下可进行摊铺碾压。

2.2 聚氨酯混合料固化规律分析

为探索聚氨酯混合料强度的增长规律,完善混合料的养护条件,本节将马歇尔稳定度作为试件的刚度指标来研究混合料强度的增长规律。根据PU-I聚氨酯的黏-温曲线,分别将聚氨酯、集料和橡胶颗粒加热至拌和温度,按照表4 PERS级配进行拌和,并成型马歇尔试件。然后将聚氨酯混合料试件分别固化2~7 d,并测定其不同固化阶段的马歇尔稳定度,试验结果如图3所示。由于单组分聚氨酯是异氰酸酯与空气中水分反应的结果,为了缩短聚氨酯混合料的固化时间,采用洒水法作为快速固化条件。在制备好马歇尔试样后,将水洒到圆柱体的顶部和底部。同时,水-聚氨酯混合料的重量比分别为0.5%、1.0%、1.5%和2.0%。洒水后,将马歇尔试件在室内环境下固化1 d,并测试其马歇尔稳定度,结果如图4所示。

表4 PERS级配组成设计

Table 4 Gradation design of PERS

集料类型	油石比/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
玄武岩集料	4.5	13.20	5.2
		9.50	23.1
		4.75	46.7
		2.36	13.8
		1.18	11.2

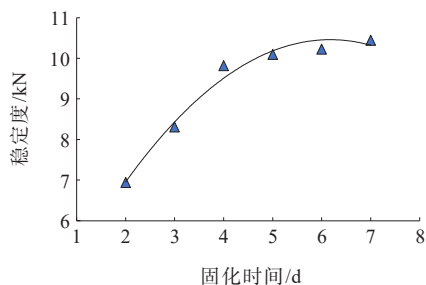


图3 自然固化下聚氨酯混合料稳定度变化趋势

Figure 3 Variation of stability of polyurethane mixture under natural curing

由图3可知:随着固化时间的增长,聚氨酯混合料的马歇尔稳定度值逐渐增大;当固化时间为2 d时,聚氨酯拌和物开始出现稳定度值;当固化时间大于等于4 d时,聚氨酯混合料稳定度值变化较小,近似达到完全固化状态。

由图4可知:聚氨酯混合料稳定度随洒水量的增加而变大。当水-聚氨酯混合料比例为2%时,其马

歇尔稳定度接近于4 d的室温固化条件下的稳定度值,表明聚氨酯混合料几乎完全固化。因此,在聚氨酯混合料试件成型过程中,采用洒水法可以提高固化速度,水-聚氨酯混合料的最佳比例为2%。

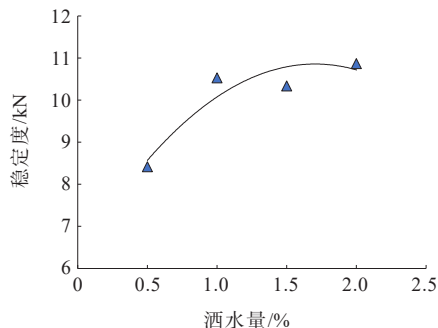


图4 加速固化下聚氨酯混合料稳定度变化趋势

Figure 4 Variation of stability of polyurethane mixture under accelerated curing

3 聚氨酯混合料路用性能研究

聚氨酯混合料中的橡胶颗粒是采用替换一部分石料的方式掺入其中,其粒径大小、表面特性、力学性质等对超弹多孔聚氨酯混合料的力学性能有重要的作用^[20]。为了分析不同橡胶颗粒替换量对超弹多孔聚氨酯混合料力学特性的影响,本节以PU-I型聚氨酯黏结剂和PERS级配为研究对象,采用1.18~4.75 mm粒径的橡胶颗粒对相应粒径的石料等体积替换,体积替换比分别为0、10%、20%,测试聚氨酯混合料的路用性能。

3.1 高温性能分析

为研究不同橡胶颗粒替换量对聚氨酯混合料抗车辙性能影响,采用传统的车辙轮碾仪来测试聚氨酯混合料的抗车辙能力,使用动稳定度指标评价聚氨酯混合料的高温性能,车辙试验结果如图5所示。

从图5可以看出:橡胶替换量与聚氨酯混合料动稳定度呈负相关变化趋势。当橡胶替换量为0时,动稳定度为22 500次/mm;当橡胶替换量达到20%时,动稳定度为12 600次/mm,较未掺橡胶颗粒时的动稳定度降低了9 900次/mm。这是由于高替换量的橡胶颗粒增加了聚氨酯混合料的柔韧性,其在荷载作用下易产生永久变形。虽然橡胶颗粒掺量降低了聚氨酯混合料的动稳定度,但是仍然满足规范要求($>5\,000$ 次/mm)。

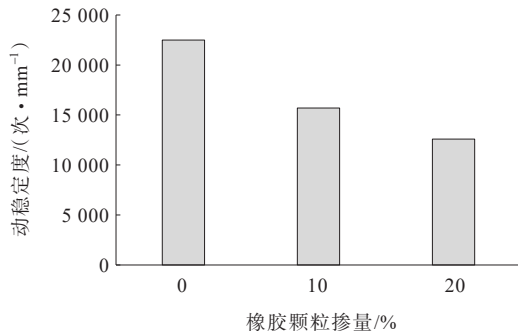


图5 不同橡胶颗粒替换量动稳定度对照组

Figure 5 Dynamic stability control group with different replacement amounts of rubber particles

3.2 低温性能分析

为了研究不同橡胶替换量对聚氨酯混合料低温抗裂性能的影响,采用万能试验机进行低温弯曲试验,当试件在中间发生断裂时记录抗弯拉强度和最大弯拉应变。小梁拉伸试验结果如图6所示。

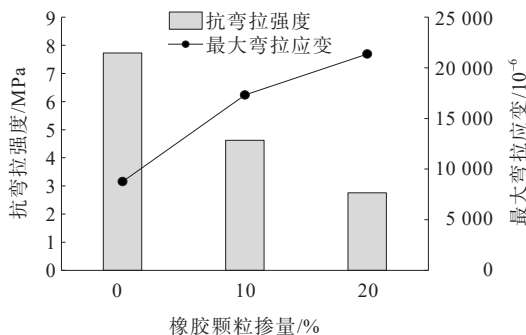


图6 不同橡胶颗粒掺量低温弯曲性能对照组

Figure 6 Low-temperature flexural performance control group with different contents of rubber particles

由图6可知:橡胶颗粒替换量与聚氨酯混合料抗弯拉强度呈负相关,与最大弯拉应变呈正相关。橡胶颗粒替换量为0时,聚氨酯混合料抗弯拉强度值最大,最大弯拉应变最小。其抗弯拉强度相较于20%橡胶颗粒的聚氨酯混合料高4.97 MPa,其最大弯拉应变相较于20%橡胶颗粒掺量的聚氨酯混合料低 $12\,596 \times 10^{-6}$ 。这是因为随着橡胶替换量变大,聚氨酯混合料的刚度下降,在外力的施加下材料出现开裂,所以橡胶含量多的聚氨酯混合料抗弯拉强度越差。由于橡胶替换量增多,材料被赋予更好的弹性形变,因此聚氨酯混合料最大弯拉应变增大。虽然聚氨酯混合料的抗弯拉强度都略低,但最大弯拉应变远高于沥青混合料,验证了超弹多孔聚氨酯具有良好的变形能力,适宜在北方寒冷地区使用。

3.3 水稳定性分析

为更方便探究橡胶颗粒对聚氨酯混合料水稳定性影响情况,本节将橡胶颗粒替换量增加为0、12.5%、25.0%进行浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、浸水飞散试验,研究不同橡胶颗粒替换量对聚氨酯混合料水稳定性的影响。试验结果如图7、8所示。

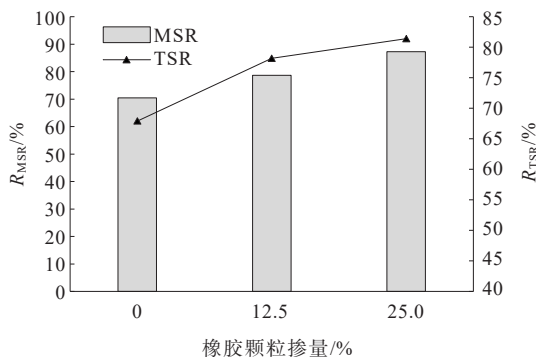


图7 不同橡胶颗粒替换量对 R_{MSR} 和 R_{TSR} 的影响

Figure 7 Influence of different replacement amounts of rubber particles on R_{MSR} and R_{TSR}

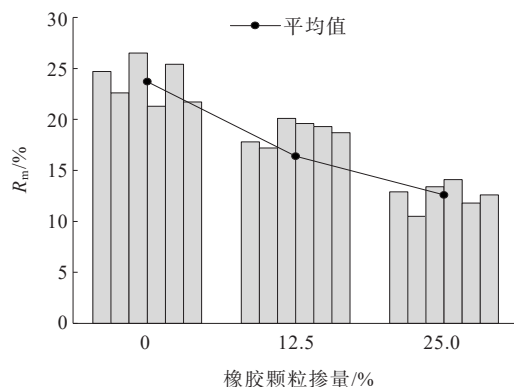


图8 不同橡胶颗粒替换量对 R_m 的影响

Figure 8 Influence of different replacement amounts of rubber particles on R_m

从图7、8可以看出:随着橡胶颗粒替换量的增加,聚氨酯混合料残留稳定度 R_{MSR} 、冻融劈裂强度比 R_{TSR} 逐渐增大,浸水飞散试验的质量损失 R_m 近似线性减小。橡胶颗粒掺量为0时残留稳定度和劈裂强度比为70.5%和67.9%。当橡胶颗粒掺量达到25%时,其残留稳定度和劈裂强度比分别达到87.3%和81.4%,较未掺加橡胶颗粒状态下分别提高了16.8个百分点和13.5个百分点。橡胶颗粒掺量为0时浸水飞散损失为23.7%。橡胶颗粒掺量达到25%时,其浸水飞散试验的质量损失为12.6%,较未掺加橡胶颗粒状态下降低了11.1个百分点。这说明橡胶颗粒的

加入提高了聚氨酯混合料的水稳定性。这是由于橡胶颗粒和聚氨酯均为有机高分子材料,二者分子极性较为接近,橡胶颗粒掺量越高,聚氨酯与集料的黏结效果越好,混合料的水稳定性越高。

3.4 抗滑性能分析

为探究橡胶颗粒对聚氨酯混合料抗滑性影响,采用摩擦摆式试验研究不同橡胶颗粒替换量对聚氨酯混合料抗滑性能的影响。试验结果如图9所示。

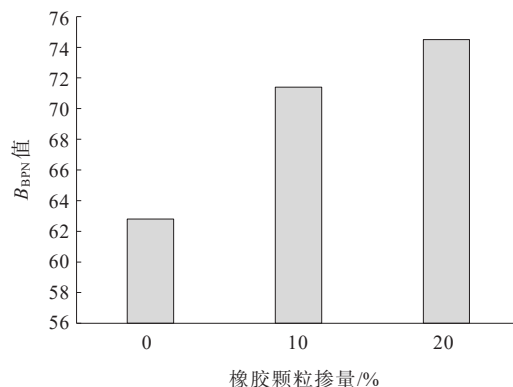


图9 不同橡胶颗粒掺量的聚氨酯混合料 B_{BPN} 平均值对照组

Figure 9 Control group of average values of B_{BPN} of polyurethane mixtures with different contents of rubber particles

由图9可以看出:随着橡胶颗粒替换量的增加,聚氨酯混合料的 B_{BPN} 值有所增大。当橡胶颗粒替换量为0时, B_{BPN} 值为62.8;当橡胶颗粒掺量达到25%时,其 B_{BPN} 值达到了74.5,较未掺加橡胶颗粒状态下分别提高了11.7。这说明橡胶颗粒的加入提高了聚氨酯混合料的抗滑性能。这是因为集料和聚氨酯充分拌和后,由于橡胶颗粒替换量的增加,会有一部分橡胶残留在车辙板上,导致摩阻力增大,使路面的抗滑性增强。

3.5 橡胶颗粒与聚氨酯混合料路用性能的关联分析

灰关联是数据处理时常用的一种方法。其原理是依照不同指标变化趋势类似或者不同时,权衡不同指标间的联系水平。采用关联度作为评价指标。在灰关联分析中,如果两个指标改变的走向保持高度相同,可推断出两个指标间联系较为紧密;如果两个指标改变的走向差异较为明显,可推断出两个指标联系较为疏远。

选取聚氨酯混合料动稳定度值为 X_{01} ,最大弯拉应变为 X_{02} , R_{TSR} 值为 X_{03} ,浸水飞散损失为 X_{04} , B_{BPN} 值为 X_{05} 。不同橡胶颗粒替换量为 X_1 ,对0、10%、20%橡胶颗粒掺量的聚氨酯混合料与路用性能进行灰关

联分析。分析数列见表5~8。

表5 原始数列
Table 5 Original series

橡胶颗粒 掺量/%	$X_{01}/$ (次 $\cdot$ mm $^{-1}$)	$X_{02}/$ 10^{-6}	$X_{03}/\%$	$X_{04}/\%$	X_{05}	X_1
0	22 500.0	8 761.0	67.9	23.7	62.8	0.0
10	15 700.0	17 324.0	78.2	16.4	71.4	0.1
20	12 600.0	21 357.0	81.4	12.6	74.5	0.2

表6 均值生成数列
Table 6 Average value generation series

橡胶颗粒 掺量/%	Y_{01}	Y_{02}	Y_{03}	Y_{04}	Y_{05}	Y_1
0	1.328 7	0.554 0	0.895 3	1.349 1	0.902 7	0.000 0
10	0.927 1	1.095 4	1.031 2	0.933 6	1.026 3	1.000 0
20	0.744 1	1.350 5	1.073 4	0.717 2	1.070 1	2.000 0

表7 两序列的绝对差
Table 7 Absolute difference between two series

橡胶颗粒 掺量/%	Δ_{011}	Δ_{022}	Δ_{033}	Δ_{044}	Δ_{055}
0	1.328 7	0.554 0	0.895 3	1.349 1	0.902 7
10	0.072 8	0.095 4	0.031 2	0.066 4	0.026 3
20	1.255 9	0.649 5	0.926 6	1.282 7	0.929 1

表8 灰关联分析结果
Table 8 Grey relational analysis results

橡胶颗粒 掺量/%	ξ_{011}	ξ_{022}	ξ_{033}	ξ_{044}	ξ_{055}
0	0.369 9	0.478 2	0.364 0	0.366 1	0.359 0
10	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0	1.000 0
20	0.383 9	0.431 3	0.355 8	0.378 6	0.352 2
关联度 γ_i	0.584 6	0.636 5	0.573 2	0.581 6	0.570 4

由表5~8可知:不同橡胶颗粒掺量与路用性能关联程度从高到低顺序为:最大弯拉应变>动稳定度>飞散损失> R_{TSR} > B_{BPN} ,说明橡胶颗粒的掺量对聚氨酯混合料的低温性能关联程度值最高,影响程度最大。

4 结论

本文针对聚氨酯混合料的固化规律进行研究,分析不同橡胶颗粒替换量对混合料路用性能的影响,得到以下结论:

(1) 聚氨酯黏结剂温度越高黏度增长越快,温度

越低黏度增长越慢。聚氨酯黏结剂黏度与温度呈负相关。在常温时(25℃)时,PU-I聚氨酯黏度为2 400 mPa $\cdot$ s,聚氨酯混合料拌和温度可以基本控制为73~81℃,并且在常温下可进行摊铺碾压。

(2) 当固化时间大于等于4 d时,聚氨酯混合料马歇尔稳定度值变化较小,近似达到完全固化状态;采用洒水法提高固化速度,水-聚氨酯混合料的最佳比例为2%。

(3) 随着橡胶颗粒替换量的增加,聚氨酯混合料高温性能略有下降,但替换20%橡胶颗粒后聚氨酯混合料仍具有优异的高温性能;橡胶颗粒替换量与超弹多孔聚氨酯混合料抗弯拉强度呈负相关,与最大弯拉应变呈正相关。

(4) 当橡胶颗粒替换量不断增多时,聚氨酯混合料的残留稳定度和劈裂强度比与替换量呈线性关系,飞散损失有不同程度的降低,说明橡胶颗粒对聚氨酯混合料水稳定性的增长有促进作用;随着橡胶颗粒替换量的增加,聚氨酯混合料的 B_{BPN} 值有所增大,说明橡胶颗粒的加入提高了聚氨酯混合料的抗滑性能。

参考文献:

References:

- [1] LU G Y, LIU P F, WANG Y H, et al. Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 220: 1052-1060.
- [2] SHEN D Y, SHI S, XU T, et al. Development of shape memory polyurethane based sealant for concrete pavement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 174: 474-483.
- [3] LIU M, HAN S, SHANG W, et al. New polyurethane modified coating for maintenance of asphalt pavement potholes in winter-rainy condition[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 133: 368-375.
- [4] 孙敏, 郑木莲, 毕玉峰, 等. 聚氨酯改性沥青改性机理和性能[J]. 交通运输工程学报, 2019, 19(2): 49-58.
SUN Min, ZHENG Mulian, BI Yufeng, et al. Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(2): 49-58.
- [5] ZHANG H, LIU Z, MENG X. Noise reduction characteristics of asphalt pavement based on indoor

- simulation tests[J]. Construction and Building Materials, 2019,215(10):285-297.
- [6] LI W, HUYAN J, TIGHE S L, et al. An innovative primary surface profile-based three-dimensional pavement distress data filtering approach for optical instruments and tilted pavement model-related noise reduction[J]. Road Materials & Pavement Design, 2019,20(1):132-150.
- [7] BAZMARA B, TAHERSIMA M, BEHRAVAN A. Retracted: Influence of thermoplastic polyurethane and synthesized polyurethane additive in performance of asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials, 2018,166:1-11.
- [8] 班午东. 橡胶颗粒沥青混合料的组成及性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.
BAN Wudong. Study on composition and performance of granulated crumb rubber asphalt mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.
- [9] 赵素艳. 橡胶沥青混合料路用性能及其温拌效果研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
ZHAO Suyan. Research on pavement performance and warm mix effect of rubber modified asphalt mixture[D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [10] 张聪. 橡胶颗粒沥青路面耐久性研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
ZHANG Cong. Study on durability of granulated crumb rubber asphalt pavement[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [11] 孙晟凯. 聚氨酯混合料材料组成优化及服役性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
SUN Shengkai. Research on optimization of material composition and service performance of polyurethane mixture[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [12] VENNAPUSA P K R, ZHANG Y, WHITE D J. Comparison of pavement slab stabilization using cementitious grout and injected polyurethane foam(article) [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016,30(6): 1-14
- [13] 仝汀朔. 聚氨酯弹性材料组成设计及路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
TONG Dingshuo. Study on composition design and pavement performance of polyurethane elastic material[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [14] CHEN T, MA T, HUANG X M, et al. The performance of hot-recycling asphalt binder containing crumb rubber modified asphalt based on physiochemical and rheological measurements[J]. Construction and Building Materials, 2019,226: 83-93.
- [15] 王火明, 李汝凯, 王秀, 等. 多孔聚氨酯碎石混合料强度及路用性能[J]. 中国公路学报, 2014,27(10): 24-31.
WANG Huoming, LI Rukai, WANG Xiu, et al. Strength and road performance for porous polyurethane mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014,27(10): 24-31.
- [16] 黎小顺. 聚氨酯混合料与沥青混合料路用性能评价对比[J]. 中外公路, 2021,41(3): 304-309.
LI Xiaoshun. Evaluation and comparison of road performance between polyurethane mixture and asphalt mixtures[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021,41(3): 304-309.
- [17] 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 Tianshuai, LU Guoyang, WANG Dawei, et al. Key properties of high-performance polyurethane bounded pervious mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019,32(4): 158-169.
- [18] 金鑫, 郭乃胜, 尤占平, 等. 聚氨酯改性沥青研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019,33(21): 3686-3694.
JIN Xin, GUO Naisheng, YOU Zhanping, et al. Research and development trends of polyurethane modified asphalt [J]. Materials Reports, 2019,33(21): 3686-3694.
- [19] 贾军红, 刘大昌. 紫外光固化聚氨酯改性沥青及其混合料自愈合性能研究[J]. 中外公路, 2022,42(5): 241-245.
JIA Junhong, LIU Dachang. Study on the self-healing performance of UV cured polyurethane modified asphalt and its mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(5):241-245.
- [20] 张长林, 张丹, 张勇强, 等. 路用水性聚氨酯改性环氧树脂的制备与工作性能[J]. 中外公路, 2022,42(1): 215-220.
ZHANG Changlin, ZHANG Dan, ZHANG Yongqiang, et al. Preparation and workability of waterborne polyurethane modified epoxy resin for road use[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022,42(1):215-220.