

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.06.001

# 聚氨酯材料在路面工程中的应用进展

郭桂宏<sup>1</sup>, 丛林<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 谭乐<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 湖州市公路管理局, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 聚氨酯是一种新型的路面铺装胶结材料。为推动聚氨酯在路面工程中的应用, 基于文献中的试验数据, 对国内外最新研究内容进行了总结。从聚氨酯与沥青的相容性、沥青性能试验和水对聚氨酯改性沥青性能的影响等方面探讨了聚氨酯改性沥青的性能。从高温车辙试验、低温弯曲小梁试验和水稳定性试验等方面探讨了聚氨酯改性沥青混合料和多孔隙聚氨酯碎石混合料的路用性能, 并研究了聚氨酯橡胶颗粒混合料的除冰性能、吸声减振性能。综述分析表明: 聚氨酯可降低沥青的针入度值, 提高沥青的延度值和软化点。动态剪切流变试验和弯曲蠕变刚度试验结果表明: 聚氨酯可提高沥青的高温和低温性能; 在聚氨酯改性沥青制备过程中加入适量的水可使沥青间氢键更加牢固, 沥青的性能得到改善。路用性能试验表明: 聚氨酯改性沥青混合料的动稳定度优异, 低温性能也得到了改善, 但水稳定性一般; 多孔隙聚氨酯碎石混合料的高温性能、水-热性能和抗疲劳能力较好, 但水稳定性和抗滑性能需要提高; 随着聚氨酯掺量的增加, 聚氨酯橡胶颗粒混合料的动稳定度、劈裂荷载、残留稳定度增加, 飞散损失值下降; 因聚氨酯和橡胶颗粒具有一定的弹性, 聚氨酯橡胶颗粒混合料的除冰性能、吸声和减振性能优越。最后, 对今后研究方向给出了一些建议。

**关键词:** 道路工程; 聚氨酯; 综述; 改性沥青; 路用性能; 混合料

中图分类号: U414

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)06-0001-10

## Application Progress of Polyurethane Material in Pavement Engineering

GUO Gui-hong<sup>1</sup>, CONG Lin<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, TAN Le<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of MOE, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Huzhou Highway Administration, Huzhou Zhejiang 313000, China)

**Abstract:** Polyurethane (PU) is a new type pavement binding material. In order to promote the application of PU in pavement engineering, the latest researches at home and abroad are summarized based on the experimental data in the literatures. First, the performance of PU modified asphalt is discussed in terms of compatibility between PU and asphalt, asphalt performance test and the influence of water on performance of PU modified asphalt. Then, the pavement performances of PU modified asphalt mixture and porous PU gravel mixture are discussed from the results of high temperature rutting test, low temperature beam bending test and water stability test, and the deicing performance, sound absorption and vibration reduction performance of PU rubber particle mixture are studied. The review and analysis show that the penetration of asphalt is decreased, the ductility and the softening point of asphalt are increased after adding PU into asphalt. The result of dynamic shear rheological test and bending creep stiffness test show that (1) PU can improve the high and low temperature properties of asphalt; (2) in the preparation of PU modified asphalt, adding appropriate amount of water can make the hydrogen bond between asphalt stronger, and can improve the asphalt performance. The road performance test shows that (1) the dynamic stability of PU modified

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 浙江省公路管理局科技计划项目(2018H22)

作者简介: 郭桂宏(1990-), 男, 山东枣庄人, 博士研究生. (858535193@qq.com)

asphalt mixture is excellent, its low temperature performance is also improved, while its water stability is general; (2) the high temperature performance, hydrothermal and fatigue resistance performance of porous PU gravel mixture are better, while its water stability and sliding resistance need to be improved; (3) with the increasing of PU content, the dynamic stability, splitting load and residual stability of PU rubber particle mixtures increase, and the value of dispersion loss decreases; (4) the deicing performance, sound absorption and vibration absorption performances of PU rubber particle mixtures are superior because of the certain elasticity of PU and rubber particles. Finally, some suggestions for future research are put forward.

**Key words:** road engineering; polyurethane; review; modified asphalt; pavement performance; mixture

## 0 引言

聚氨酯甲酸酯（简称聚氨酯 polyurethane, PU）是一种新型的高分子合成材料。1937年，德国的O. Bayer等在勒沃库森的I. G. Farben实验室研发出来，现已成为世界上6大合成材料之一。聚氨酯胶结料具有黏结力强、性能稳定、能耗低等优点，目前已应用于家具、地毯衬垫、汽车内饰件、包装材料、涂料、密封胶、胶黏剂和弹性体等领域。且聚氨酯可常温拌和，其化学组分、分子结构和宏观性能具有极大的调控阈值<sup>[1-3]</sup>，为铺面材料一直追求的“基于性能的材料设计方法”提供了物质基础和理论空间。再者，聚氨酯混合料作为一种以聚氨酯为胶结料的新型路面铺装材料，具有更好的耐久性、高温稳定性等路用性能，可以大幅减少养护维修频率与费用。

本研究全面综述了国内外聚氨酯在路面工程领域的应用研究成果。从聚氨酯改性沥青、聚氨酯改性沥青混合料、多孔隙聚氨酯碎石混合料、聚氨酯橡胶颗粒混合料等方面评述最新的研究成果，并总结它们各自优良的路用性能。最后，指出了下阶段研究的重点，以期为聚氨酯在道路工程中的应用研究提供参考。

## 1 聚氨酯的性质

聚氨酯（PU）作为一种高分子材料，是由二异氰酸酯和二元醇聚合而成的嵌段共聚物。其结构如图1所示。主链由软链段与硬链段构成。硬链段由二异氰酸酯、小分子扩链剂构成；软链段由大分子量的多元醇或多元胺构成。硬链段具有较高的玻璃化转变温度和熔融温度，提供聚氨酯的高硬度和强度；而软链段使聚氨酯具有柔顺性和弹性。聚氨酯以良好的性能广泛应用在黏结剂、建筑和包装材料等领域<sup>[4]</sup>。

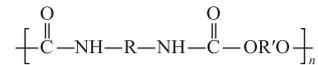


图1 聚氨酯的结构

Fig. 1 Structure of PU

## 2 聚氨酯改性沥青及沥青混合料

### 2.1 相容性

聚氨酯与沥青间的相容性影响改性效果，因聚氨酯的介电常数大于3.6，沥青的介电常数在2.6到3.0之间。班孝义<sup>[5]</sup>采用MOCA作为相容剂，通过离析试验表征沥青与聚氨酯间的相容性，得到的试验结果如图2所示。当掺量为2%时，改性沥青的离析程度最小，其值远低于规范要求，说明聚氨酯改性沥青的稳定性较好。

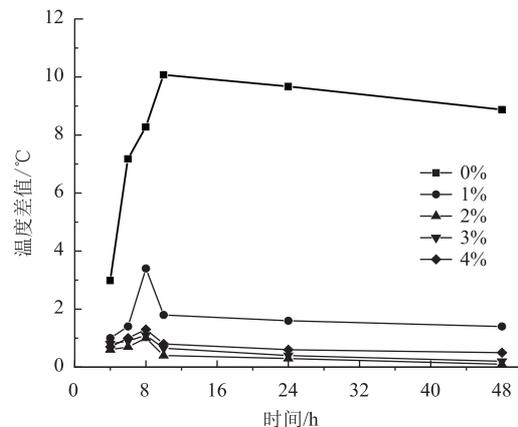


图2 相容剂掺量对聚氨酯改性沥青离析性能的影响

Fig. 2 Influence of compatibilizer content on segregation performance of PU modified asphalt

### 2.2 沥青性能试验结果

班孝义将3种聚氨酯（聚醚型JM-PU、聚酯型JZ-PU、PTMEG型）在相同的掺量下（7%）用于沥青改性，得到3种聚氨酯改性沥青（JM-APU7, JZ-APU7, PT-APU7）。夏磊<sup>[6]</sup>、刘颖等<sup>[7]</sup>和张丰雷等<sup>[8]</sup>分别在沥青中掺加10%（蓖麻油基聚氨酯）、

4.27% (端异氰酸酯预聚体) 和 10% (水性聚氨酯) 的聚氨酯, 记为 APU10, APU4.27, APU10-1。Bazmara 等<sup>[9]</sup> 将热塑性聚氨酯 (TPU) 和聚氨酯 (PU) 按不同的比例 (3%, 5%, 7%) 制备聚氨酯改性沥青, 记为 ATPU3, ATPU5, ATPU7, APU3, APU5, APU7, 然后在聚氨酯改性沥青中添加 2% 的水得到泡沫聚氨酯改性沥青, 记为 AF3, AF5, AF7。韩继成<sup>[10]</sup> 将 7% 聚氨酯 (聚醚型) 掺加到 3 种 90# 基质沥青中 (韩国 SK、国创、克拉玛依) 制备得到 3 种 PU 改性沥青, 分别记为 PSK7, PGC7, PKL7。将文献 [5-10] 中的针入度、软化点和延度试验结果整理如图 3~图 5 所示。由图 3 可知, 聚氨酯加入到沥青中后, 针入度下降 (文献 [6] 中试验结果除外)。由文献 [5] 可知, 聚氨酯的种类会影响沥青的针入度指标。由文献 [9] 可知, 针入度

下降幅度最大的是泡沫聚氨酯改性沥青, 下降幅度最小的是热塑性聚氨酯改性沥青。在软化点方面, 由图 4 可知, 聚氨酯加入到沥青中后, 软化点升高 (文献 [7] 中数据除外), 说明聚氨酯可有效提升沥青的高温性能。在文献 [9] 中, 泡沫聚氨酯改性沥青的软化点是最高的。由图 5 和文献 [5-6, 10] 中的数据可知, 聚氨酯加入沥青后, 沥青的延度值上升, 但在文献 [8] 中, 延度试验的温度为 10℃, 基质沥青的延度值为 76 cm, 聚氨酯在沥青中的掺量为 10%, 20%, 30% 时, 聚氨酯改性沥青的延度值仅为基质沥青的 18.4%, 12.9%, 12.1%, 表明聚氨酯对沥青的延度指标有很大的负影响, 造成数据差别较大的原因是否与聚氨酯的种类有关, 还需进一步探讨。综上所述, 聚氨酯总体上可降低沥青的针入度值, 提高沥青的延度值和软化点。

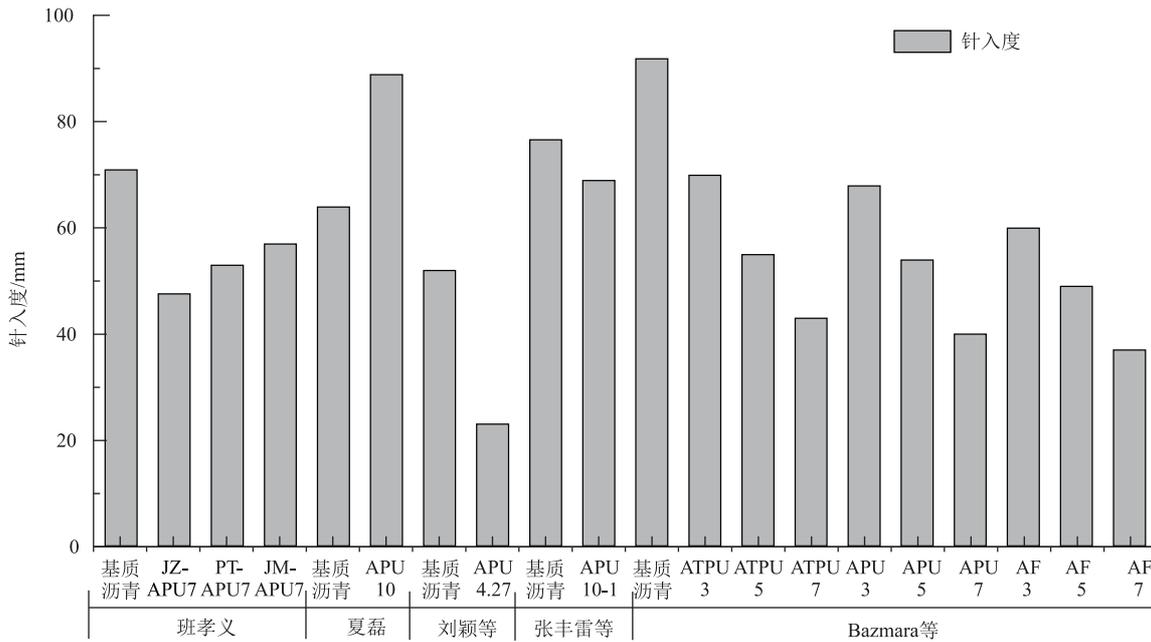


图 3 聚氨酯改性沥青针入度试验结果

Fig. 3 Penetration test results of PU modified asphalt

### 2.3 动态剪切流变 (DSR) 试验

班孝义通过针入度、软化点和延度试验证明了 3 种聚氨酯 (聚醚型 JM-PU、聚酯型 JZ-PU、PTMEG 型) 在改性沥青中的最佳掺量分别为 11% (记为 JM-APU11), 7% 和 7%。将 3 种性能优越的聚氨酯改性沥青用于 DSR 试验, 结果显示 3 种聚氨酯改性沥青的复数模量 ( $G^*/\sin \delta$ ) 均高于基质沥青, 相位角均低于基质沥青, 如图 6 所示。这说明聚氨酯可提高沥青的高温抗车辙能力, 其中, JM-APU 型聚氨酯对沥青的改性效果最好。刘颖等在试验中证明了聚氨酯改性沥青的  $G^*/\sin \delta$  是 SBS 改性沥青的 7

倍。基于舒睿<sup>[11]</sup> 论文中的试验数据, 将抗车辙因子由大到小的排序为: 50% 聚氨酯改性沥青 > 30% 聚氨酯改性沥青 > SBS 改性沥青 > 70# 基质沥青, 说明在一定范围内加入聚氨酯越多, 聚氨酯改性沥青的高温性能越好。

Bazmara 等利用温度扫描试验测试了沥青可适应的最高温度。对于旋转薄膜烘箱短期老化后的改性沥青, 试验条件为  $G^*/\sin \delta \geq 1.0$  kPa; 对于长期老化后的改性沥青, 试验条件为  $G^*/\sin \delta \geq 2.2$  kPa。试验得到沥青可适应的最高温度如图 7 所示。当聚氨酯添加到沥青中后, 沥青可适应的最高温度升高。

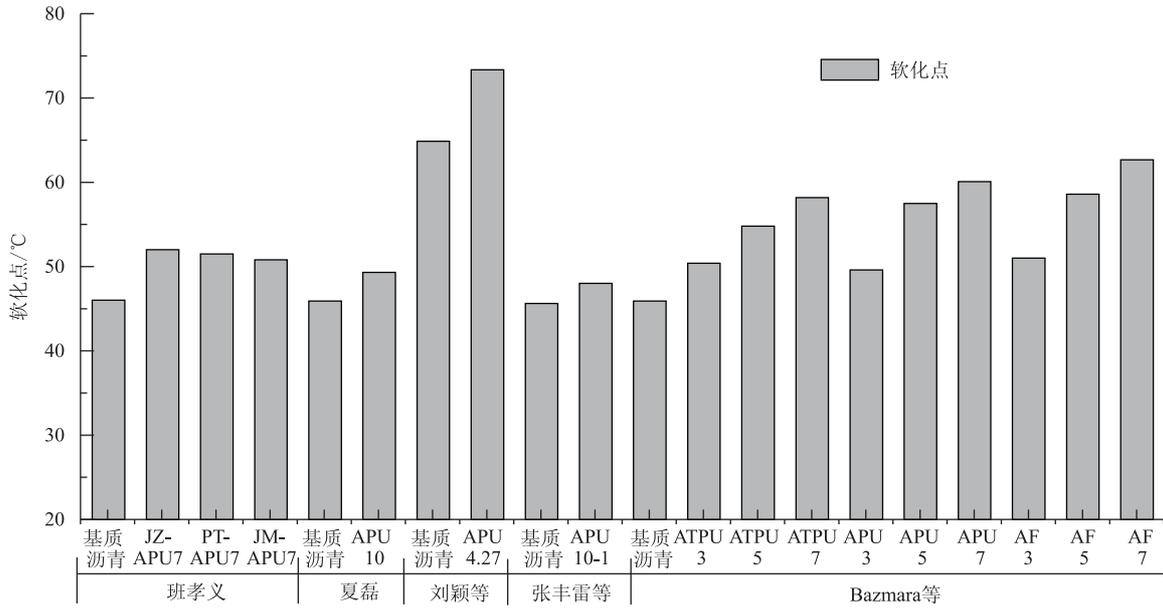


图4 聚氨酯改性沥青软化点试验结果

Fig. 4 Softening point test results of PU modified asphalt

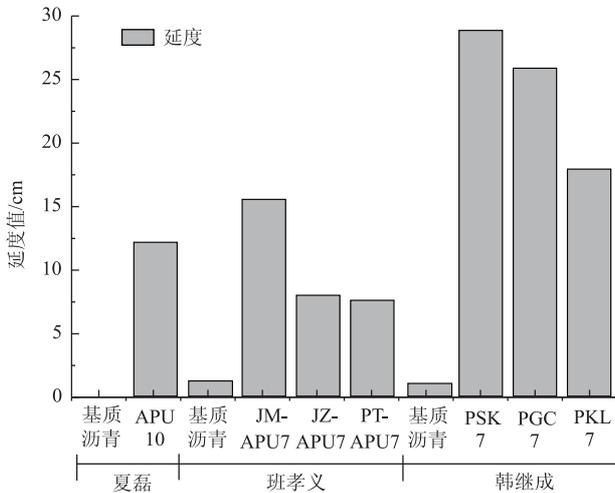


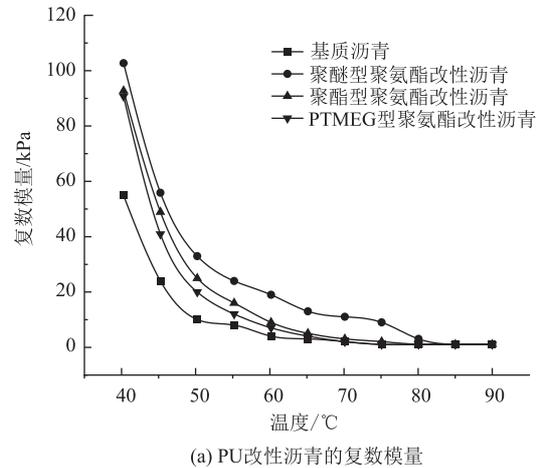
图5 聚氨酯改性沥青延度试验结果

Fig. 5 Ductility test results of PU modified asphalt

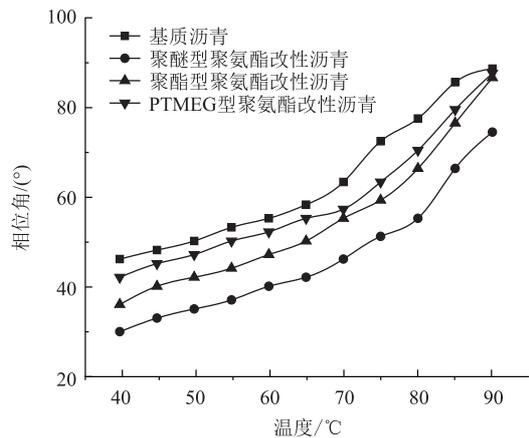
该温度也会受到聚氨酯的类型影响,当掺量为7%时,ATPU7,APU7和AF7,改性沥青可适应的最高温度(短期老化后)相比基质沥青分别提高了24.5%,15.8%,26.3%,长期老化后分别提高了22.2%,21.0%,26.9%,AF7改性沥青可适应的最高温度提升幅度最大,说明聚氨酯改性沥青中加水对沥青的抗老化性能有利。

#### 2.4 沥青弯曲蠕变劲度试验

班孝义证明,当温度分别为 $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PU改性沥青的蠕变速率 $m$ 值都比基质沥青的大,PU改性沥青的劲度模量 $S$ 值均小于基质沥青,如图8所示,其中聚醚型的改性效果最好。根据文献[11]中



(a) PU改性沥青的复数模量



(b) PU改性沥青的相位角

图6 PU改性沥青的DSR试验结果

Fig. 6 DSR test results of PU modified asphalt

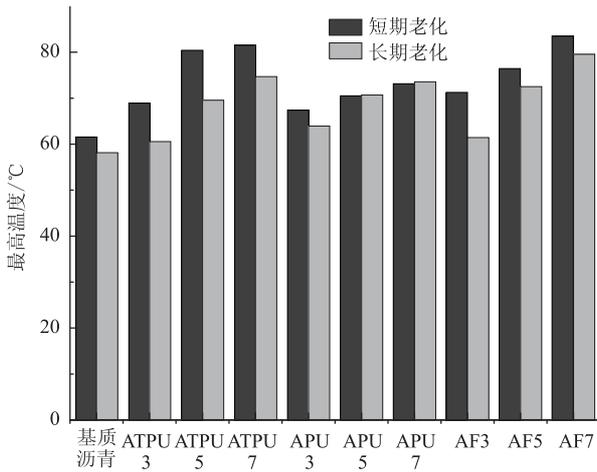


图 7 文献 [9] 中温度扫描试验结果整理  
Fig. 7 Temperature scanning test results in Ref. [9]

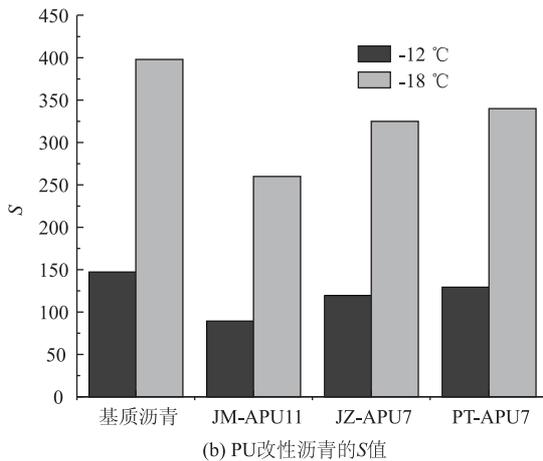
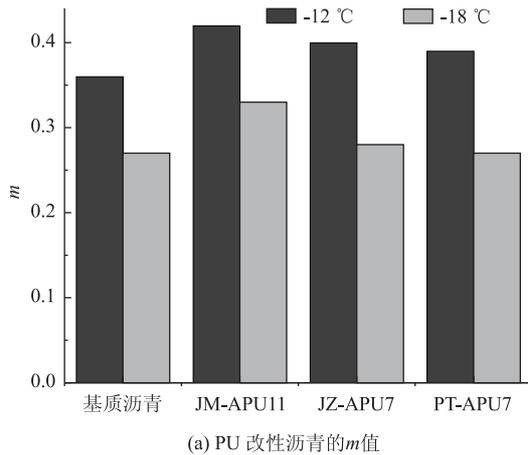


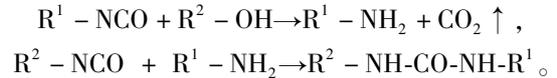
图 8 PU 改性沥青的 BBR 试验结果

Fig. 8 BBR test results of PU modified asphalt

的数据, 将 S 值和 m 值排列为: 50% PU > 30% PU > 4% SBS > 70# 基质沥青。改性沥青中聚氨酯的掺量越高, 沥青的低温性能越好。但 Bazmara 等证明了聚氨酯改性沥青和基质沥青具有相同的低温性能。这些结果说明聚氨酯总体上可改善沥青得低温性能。

## 2.5 聚氨酯改性沥青与水间的关系

由图 3、图 4、图 7 可知, 在聚氨酯改性沥青的制备过程中, 加入水可使改性沥青的高温性能均优于其他沥青。Bazmara 等将 2% 的水加入聚氨酯改性沥青中得到泡沫聚氨酯改性沥青, 试验表明水与游离异氰酸酯 (NCO) 反应生成  $-NH_2$ , 坚固的新氢键会使沥青更加坚固, 且聚氨酯、沥青分子和水之间因化学反应会生成聚合物沥青膜, 使沥青的黏度增大, 具有更高的模量和黏度。Carrera<sup>[12]</sup> 认为水和聚氨酯会发生如下化学反应:



经化学反应后, 两个或更多更小的胶体单元连接成 1 个复杂的微观结构。Cuadri 等<sup>[13]</sup> 采用两种不同的方式 (加水或室外环境养护 6 个月) 养护试件, 认为在聚氨酯和沥青充分反应后, 再加入 2% 的水用于消耗游离的 NCO, 可得到牛顿黏度 (60 °C) 较高的改性沥青。对比试验表明聚氨酯和沥青充分反应后置于室外环境中养护效果最好。Izquierdo 等<sup>[14]</sup> 用聚氨酯预聚体改性沥青, 然后将 2% 的水加入到改性沥青中制备泡沫聚氨酯改性沥青, 结果表明泡沫改性沥青的黏度流值高于聚氨酯改性沥青, 且 DSR 试验表明温度在 60 °C 以上时水会使聚氨酯沥青的储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  增加。这些结果说明, 在聚氨酯与沥青反应后, 加入水以消耗改性沥青中游离的异氰酸酯 (NCO), 会使改性沥青具有更好的性能。

## 2.6 聚氨酯改性沥青混合料的路用性能

由聚氨酯改性沥青的试验数据可知, 聚氨酯改性沥青具有良好的性能。通过对比聚氨酯改性沥青混合料的路用性能, 逐步完善对聚氨酯改性沥青混合料的认识。

### (1) 动稳定度试验

本研究对文献 [5, 7, 11, 15, 16] 中的动稳定度试验数据进行整理得到的结果如表 1 所示。虽然聚氨酯的掺量不同, 但聚氨酯改性沥青混合料 (PUM) 的动稳定度均高于基质沥青混合料, 最大的是基质沥青混合料的 6.2 倍。对聚氨酯改性沥青混合料的动稳定度与 SBS 改性沥青混合料间的优异性无法做出判断, 这可能是聚氨酯掺量、混合料级配间差异引起的。

### (2) 低温弯曲小梁试验

本研究整理了低温弯曲小梁试验数据, 结果如表 2 所示。由文献 [5] 可知, 聚氨酯改性沥青混合料的抗弯拉强度分别是基质沥青混合料、SBS 改性

表1 动稳定度试验结果 (单位: 次/mm)

Tab. 1 Dynamic stability test results (unit: times/mm)

文献	[5]	[7]	[11]	[15]	[16]				
基质沥青	1 618	—	2 500	2 500	2 800	2 800	18 437	18 437	18 437
PU 掺量	11	4.27	30	50	30	50	10	20	30
聚氨酯改性混合料	3 657	8 289	13 500	31 000	8 630	10 862	17 765	19 213	18 257
SBS 沥青混合料	4 562	9 001	—	—	3 600	3 600	—	—	—

表2 低温弯曲小梁试验结果

Tab. 2 The results of Low temperature bending test

文献	[5]	[7]	[11]							
混合料胶结料	基质沥青	JM-APU11	SBS	基质沥青	APU4.27	SBS	基质沥青	APU (30%)	APU (50%)	SBS
最大荷载/N	1 009.3	1 384.3	1 186.3	—	—	—	839.6	660.2	502.9	1 276.5
抗弯拉强度/MPa	7.72	11.07	9.17	—	—	—	7.35	5.54	3.89	9.89
最大弯拉应变/( $\times 10^{-3}$ )	2.31	4.35	3.11	5.697	5.525	6.639	2.268	3.056	4.476	2.819
弯曲劲度模量/MPa	2 544	3 349	2 952	1 468	1 293	2 493	3 238	1 813	860	3 509

### (3) 水稳定性

浸水马歇尔试验的数据整理在图9中。由文献[5]和文献[7]可知,聚氨酯混合料的残留稳定性和残留劈裂强度值都很大,均好于基质沥青混合料和SBS改性沥青混合料,而在文献[11,15]

沥青混合料的1.4倍、1.2倍,聚氨酯改性沥青混合料的最大弯拉应变分别是它们的1.9倍、1.4倍,表明聚氨酯改性沥青混合料的抗弯拉强度得到改善。舒睿用聚氨酯改性沥青作为混合料的胶结料,聚氨酯在沥青中的掺量为30%和50%,分别记为APU(30%)和APU(50%),试验结果表明聚氨酯改性沥青混合料的低温性能要好于4%SBS改性沥青混合料。然而,文献[7]的数据显示聚氨酯改性沥青的低温抗裂性能较差,但满足规范要求。这些结果说明,聚氨酯总体上可改善沥青混合料的低温性能。

中聚氨酯的水稳定性较差。其中,文献[15]中聚氨酯在沥青中的掺量分别为30%和50%,记为APU-30和APU-50。对于产生差异性的原因是否与混合料的级配、聚氨酯的种类有关,还需进一步探讨。

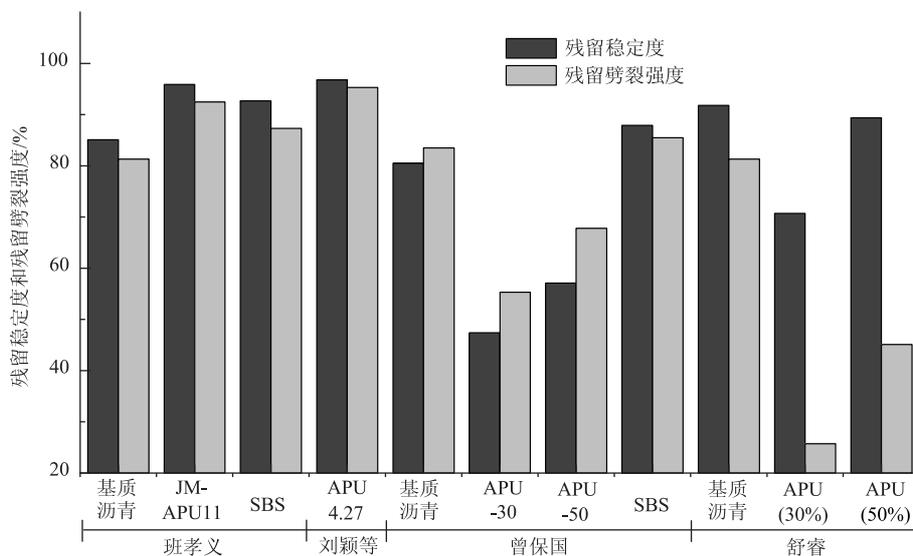


图9 水稳定性试验结果

Fig. 9 Water stability test results

### 3 多孔隙聚氨酯碎石混合料

多孔隙聚氨酯碎石混合料(PPM)是一种新型的道路铺面材料,采用聚氨酯与单粒径或间断级配混合而成,其孔隙率较大,为18%~25%,具有排

水、降噪、降温、环保等功能。

#### 3.1 高温性能

王火明等<sup>[17]</sup>采用3种单一粒径的碎石(大理岩,粒径为3~5mm;大理岩,粒径为4~6mm;花岗岩,粒径为5~10mm)与聚氨酯混合得到多孔聚

氨酯碎石混合料 (PPM-A, PPM-B, PPM-C)。王统井<sup>[18]</sup>将聚氨酯与 OGFC-13 混合制备成 PPM, 聚氨酯的掺量分别为 3% 和 5%, 记为 PPM (3%) 和 PPM (5%), 其余类推; 多孔隙沥青混合料记为 APM, 试验数据如表 3、表 4 所示。由表 3 可知, PPM 的动稳定度较大, 具有良好的抗变形能力。随着集料粒径的增大, 混合料的动稳定度减小; 随聚氨酯掺量的增加, 混合料的动稳定度增大。由表 4 可知, PPM 的蠕变斜率均较大, 说明多孔聚氨酯碎石混合料具有良好的抵抗永久变形能力。PPM 混合料的最终变形大于 AC-13 和 PAC-13, 说明 PPM 具有良好的水-热稳定性能。

表 3 车辙试验结果对比

Tab. 3 Comparison of rutting test results

文献	[18]			[17]		
混合料类型	PPM(3%)	PPM(5%)	APM(6%)	PPM-A	PPM-B	PPM-C
动稳定度/ (次·mm <sup>-1</sup> )	4 117	48 461	3 567	8 945	7 909	5 209

表 4 浸水车辙试验结果

Tab. 4 Results of immersed rutting test

文献	[19]				
混合料类型	PPM-A	PPM-B	PPM-C	AC-13	PAC-13
蠕变斜率/( $\times 10^{-3}$ )	-0.11	-0.08	-0.27	-0.31	-0.12
最终变形/mm	-4.21	-3.78	-4.37	-6.89	-4.10

### 3.2 水稳定性

王统井、王火明等<sup>[17]</sup>都在论文中探讨了 PPM 的水稳定性。王统井采用沥青混合料浸水马歇尔冻融劈裂试验规程, 王火明等调整了水泥混凝土抗冻性能试验方法, 试件尺寸为 100 mm  $\times$  100 mm  $\times$  100 mm 立方体, 试验步骤为: 40  $^{\circ}$ C 环境下养护 24 h, 20  $^{\circ}$ C 水中浸泡 24 h, -18  $^{\circ}$ C 中冰冻 4 h, 最后 20  $^{\circ}$ C 水中浸泡 4 h。此过程重复 5 次后测试件的损失率。数据如表 5 所示。可知 PPM 的质量损失较小, 但强度损失达到 15% 左右, 说明 PPM 的抗冻性一般。在文献 [18] 中, PPM 的劈裂强度比均小于沥青混合料的, 这些结果说明, PPM 的水稳定性能有待提高。

表 5 水稳定性试验结果对比

Tab. 5 Results comparison of water stability test

文献	[18]					[17]		
混合料类型	PPM (2%)	PPM (3%)	PPM (4%)	PPM (5%)	APM (4.3%)	PPM-A	PPM-B	PPM-C
冻融循环数/次	1	1	1	1	1	5	5	5
劈裂强度比/%	82	73	74	75	91	—	—	—
质量损失/%	—	—	—	—	—	0.09	0.07	0.10
强度损失/%	—	—	—	—	—	14.8	16.6	13.1

### 3.3 抗滑性

王统井和王火明等<sup>[17]</sup>都对 PPM 的抗滑性能进行了测试。测试得到摆式摩擦系数 BPN 的数据如图 10 所示。可以看出, 虽然二者所用材料不同, 但都能满足抗滑性能要求, 由文献 [17] 中的测试数据可知, 随集料粒径增大, 抗滑性能增强; 由文献 [18] 可知, PPM 的抗滑性能低于沥青混合料的, 且随着聚氨酯含量的增加, 抗滑性能降低。故目前还不能定论, 需进一步探讨。

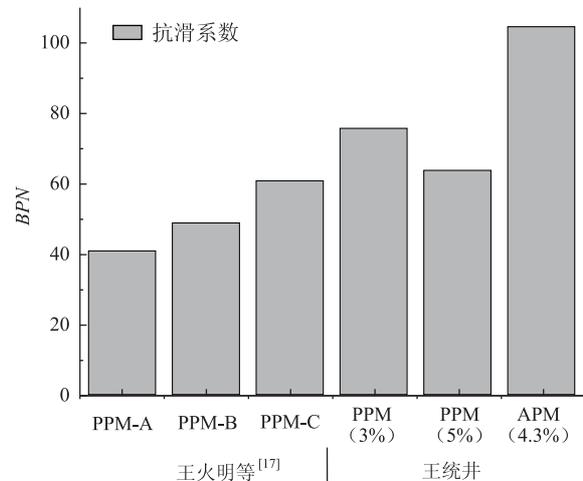


图 10 抗滑性能数据

Fig. 10 Data of anti-skid performance

### 3.4 疲劳特性

王统井和王火明等<sup>[17]</sup>分别用四点弯曲疲劳试验和间接拉伸试验测试 PPM 的疲劳特性。四点弯曲疲劳试验结果显示 PPM 试件在 200 万次加载后未出现破坏。王火明等认为 PPM 的疲劳性能与聚氨酯的力学性能相关。间接拉伸试验结果显示 PPM 的疲劳寿命远高于 APM, 但在应力比较大时, 冻融循环会对 PPM 的疲劳寿命产生较大的负影响。这些结果说明, PPM 具有良好的抗疲劳特性。

## 4 聚氨酯橡胶颗粒混合料

空隙弹性路面 (PERS) 是当前降噪效果最好的低噪声路面之一, 降噪高达 12 dB(A), 空隙弹性混合料主要以聚氨酯聚合物作为胶黏剂。

### 4.1 路用性能

将文献 [20] 中的数据整理为表 6。在聚氨酯掺量方面, 随着掺量增加, 聚氨酯橡胶颗粒混合料的动稳定度、劈裂荷载、残留稳定度增加, 飞散损失值下降, 即增加聚氨酯的掺量可提升聚氨酯橡胶颗粒混合料的路用性能。在橡胶颗粒加入后, 聚氨

酯橡胶颗粒混合料的动稳定度增加,在某些工况下,聚氨酯橡胶颗粒混合料的动稳定度是普通沥青混合料的10倍。在水稳定性方面,劈裂强度在加入橡胶颗粒后降低,而文献[21]证明聚氨酯橡胶颗粒混合料的残留稳定度均满足规范要求,掺量为16%时,混合料的残留稳定度最大,为88.6%。这些结果说明,聚氨酯橡胶颗粒混合料的水稳定性还需进一步探究。在飞散试验方面,由表6数据可知,橡胶颗粒加入后,损失率降低,文献[21]也证明了聚氨酯橡胶颗粒混合料在抗松散和抗冲击性方面具有优势。

表6 聚氨酯橡胶颗粒混合料路用性能试验结果  
Tab.6 Test result of pavement performance of PU rubber granular mixture

项 目	类型			
	聚氨酯膜厚度/ $\mu\text{m}$			
	66	83	66	83
	橡胶体积用量/%			
	0	0	50	50
动稳定度/(次 $\cdot\text{mm}^{-1}$ )	24 511	104 999	97 843	156 720
劈裂荷载/kN	7.59	12.80	3.54	3.84
标准飞散损失/%	7.91	3.81	2.34	1.94
浸水分散损失/%	62.03	4.83	2.74	2.27
残留稳定度/%	58.82	77.65	61.64	72.40

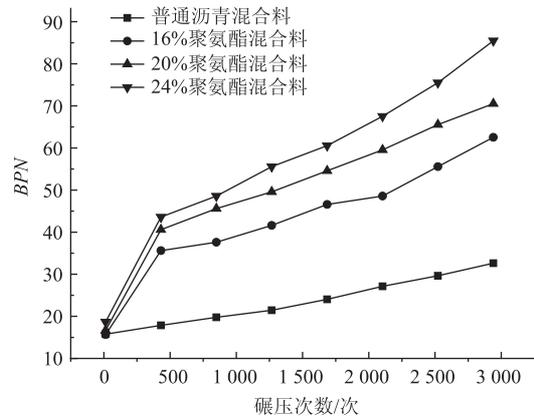
#### 4.2 除冰性能

因固化后的聚氨酯和橡胶颗粒都具有一定的弹性,故聚氨酯橡胶颗粒混合料路面也具有一定的弹性。冬季时路面结冰,因路面具有变形能力,在车辆荷载下,变形能力小的冰层会发生破裂,达到除冰的效果。孙帅利用改装的除冰雪试验仪测试路面的除冰能力,其试验装置与数据如图11所示。步骤为:利用除冰雪试验仪碾压冰冻后的车辙板试件,每碾压420次后,测量轮迹带的摆式摩擦系数 $BPN$ 值(用以评价除冰效果)。 $BPN$ 值越大,除冰效果越好。结果显示,聚氨酯橡胶颗粒混合料车辙板的 $BPN$ 值均大于普通沥青混合料,且随着橡胶颗粒的掺量增加, $BPN$ 值增大,说明聚氨酯混合料的除冰性能越好。Wang<sup>[22]</sup>采用重锤击打混合料表面的冰层分析聚氨酯橡胶颗粒混合料路面上冰层位移与厚度的关系,试验装置和试验结果如图12所示。聚氨酯橡胶颗粒混合料路面上冰层的竖向位移都大于普通沥青混凝土路面。此外,张恒<sup>[23]</sup>利用有限元判别函数计算得到:当橡胶颗粒体积比为20%时,路面除冰效果

最好。肖庆一等<sup>[24]</sup>认为冰层的断裂主要是由弯拉变形引起的。



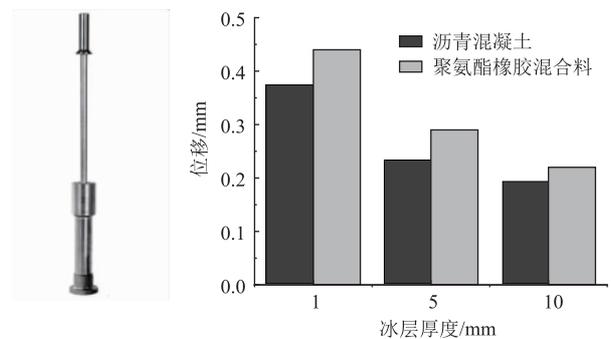
(a) 自制除冰雪试验仪



(b) 除冰雪试验结果

图11 除冰雪试验装置与试验结果

Fig.11 Deicing test device and test result



(a) 重锤试验装置

(b) 路面的冰层厚度与位移间关系

图12 重锤试验装置与试验结果

Fig.12 Heavy hammer test device and test result

#### 4.3 声学和减振性能

孙铭鑫<sup>[20]</sup>参考沥青混合料的动态模量试验,分析了橡胶颗粒体积含量与混合料减振的关系,发现橡胶颗粒所占体积比越大,聚氨酯混合料的减振效果越好。Wang<sup>[25]</sup>通过连续气流法测定气流电阻率,证明聚氨酯橡胶颗粒混合料吸收系数均大于参考变量(普通沥青混合料)。

## 5 研究建议

(1) 目前聚氨酯种类较多。首先应在熟悉聚氨酯分子构成的基础上, 在分子层面探讨聚氨酯与沥青间的结合问题, 如调节聚氨酯分子中软硬段比例、分子外接链等, 或选择合适改性剂、相容剂和扩链剂, 以提高聚氨酯和沥青间相界面的性能, 增加相间的黏合力<sup>[26]</sup>。

(2) 在聚氨酯改性沥青完成后, 加入适量的水能进一步提高聚氨酯改性沥青的性能, 但目前聚氨酯的种类较多, 聚氨酯的种类是否会影响此结论, 应在后续研究中进一步探讨。

(3) 探讨聚氨酯材料在道路工程其他领域的应用研究。

(4) 部分实验室评价沥青混合料路用性能的仪器设备不适用于评价多孔隙聚氨酯碎石混合料、聚氨酯橡胶颗粒混合料的路用性能, 应建立起多孔隙聚氨酯碎石混合料、聚氨酯橡胶颗粒混合料的路用性能评价体系。多孔隙聚氨酯碎石混合料、聚氨酯橡胶颗粒混合料生产工艺与沥青混合料生产工艺有一些差别, 应增加这两个方面的研发力度, 为今后的大规模应用提供技术准备。

## 6 结论

聚氨酯沥青不仅可以改善沥青的性能, 而且自身具有较强的黏结性。本研究探讨了不同的聚氨酯混合料在路面中的应用研究进展, 通过对文献中的试验数据分析, 得到如下结论。

(1) 在聚氨酯改性沥青方面, 虽聚氨酯与沥青的极性相差较大, 添加相容剂后可增加聚氨酯改性沥青体系的稳定性。聚氨酯加入到沥青后, 总体上, 沥青的针入度下降、软化点升高, 延度值增大, 说明了聚氨酯可改善沥青的高低温性能。但某些工况下聚氨酯对沥青的延度值有负影响。在流变试验中, 聚氨酯可提高沥青的  $G^*/\sin \delta$ 。再者, 适量的水可提高聚氨酯改性沥青的性能。

(2) 聚氨酯改性沥青混合料的动稳定度均高于基质沥青混合料。聚氨酯可改善沥青混合料的高温性能, 但某些工况下, 由于混合料级配、聚氨酯掺量等原因, 导致聚氨酯改性沥青的低温抗裂性能不及 SBS 改性沥青。

(3) 多孔隙聚氨酯碎石混合料的孔隙率较大, 但其高温性能、抗疲劳能力和水-热性能较好。此外, 该混合料水稳定性有待提高。

(4) 随着聚氨酯掺量的增加, 聚氨酯橡胶颗粒混合料的动稳定度、劈裂荷载、残留稳定度增加, 飞散损失值下降, 即增加聚氨酯的掺量可提高聚氨酯橡胶颗粒混合料的路用性能, 但水稳定性尚不明确。同时, 聚氨酯橡胶颗粒混合料的除冰性能、吸声和减振性能较优越。

### 参考文献:

### References:

- [1] 瞿金清, 陈焕钦. 水性聚氨酯涂料研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2003, 19 (2): 43-47.  
QU Jin-qing, CHEN Huang-qin. Development of Waterborne Polyurethane Paints [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2003, 19 (2): 43-47.
- [2] 赵孝彬, 杜磊, 张小平, 等. 聚氨酯弹性体及其微相分离 [J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18 (2): 16-20.  
ZHAO Xiao-bin, DU Lei, ZHANG Xiao-ping, et al. Polyurethane Elastomers and Microphase Separation [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2002, 18 (2): 16-20.
- [3] 钟发春, 傅依备, 尚蕾, 等. 聚氨酯弹性体的结构与力学性能 [J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21 (2): 211-214.  
ZHONG Fa-chun, FU Yi-bei, SHANG Lei, et al. Structure and Mechanical Properties of Polyurethane Elastomers [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2003, 21 (2): 211-214.
- [4] 李彩霞. 聚氨酯改性沥青的制备及混合料路用性能评价 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2017, 41 (6): 958-963.  
LI Cai-xia. Preparation of Polyurethane Modified Asphalt and Research on Road Performance Evaluation of Mixture [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition, 2017, 41 (6): 958-963.
- [5] 班孝义. 聚氨酯 (PU) 改性沥青的制备与性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.  
BAN Xiao-yi. Study on Preparation and Properties of Polyurethane (PU) Modified Asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [6] 夏磊. 聚氨酯改性沥青的性能研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2016.  
XIA Lei. Study on Properties of Polyurethane Modified Asphalt [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.
- [7] 刘颖, 辛星. 道路用聚氨酯改性沥青的制备工艺研究 [J]. 中外公路, 2015, 35 (5): 255-259.  
LIU Ying, XIN Xing. Study on Preparation Technology of Polyurethane Modified Asphalt for Pavement [J]. Journal

- of China & Foreign Highway, 2015, 35 (5): 255-259.
- [8] 张丰雷, 凌晨, 王焱, 等. 水性聚氨酯改性乳化沥青制备及性能研究 [J]. 功能材料, 2018, 49 (2): 2183-2186.  
ZHANG Feng-lei, LING Chen, WANG Yan, et al. Preparation and Properties of Waterborne Polyurethane Modified Emulsified Asphalt [J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49 (2): 2183-2186.
- [9] BAZMARA B, TAHERSIMA M, BEHRAVAN A. Influence of Thermoplastic Polyurethane and Synthesized Polyurethane Additive in Performance of Asphalt Pavement [J]. Construction & Building Materials, 2018, 166: 1-11.
- [10] 韩继成. 聚氨酯 (PU) 改性乳化沥青制备及性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.  
HAN Ji-cheng. Study on Manufacturing and Properties of Polyurethane (PU) Modified Emulsified Asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.
- [11] 舒睿. 聚氨酯改性沥青及其混合料的性能研究 [D]. 北京: 北京建筑大学, 2016.  
SHU Rui. Research on Performance of Polyurethane Modified Asphalt and Its Mixture [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2016.
- [12] CARRERA V, CUADRI A A, GARCÍA-MORALES M. The Development of Polyurethane Modified Bitumen Emulsions for Cold Mix Applications [J]. Materials & Structures, 2015, 48: 3407-3414.
- [13] CUADRI A A, GARCÍA-MORALES M, NAVARRO, F J, et al. Processing of Bitumen Modified by a Bio-oil-derived Polyurethane [J]. Fuel, 2014, 118: 83-90.
- [14] IZQUIERDO M A, NAVARRO F J, MARTÍNEZ-BOZA F J, et al. Bituminous Polyurethane Foams for Building Application; Influence of Bitumen Hardness [J]. Construction & Building Materials, 2012, 30: 706-713.
- [15] 曾保国. 聚氨酯改性沥青混合料路用性能研究 [J]. 湖南交通科技, 2017, 43 (1): 70-72.  
ZENG Bao-guo. Study on Pavement Performance of Polyurethane Modified Asphalt Mixture [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2017, 43 (1): 70-72.
- [16] 卜鑫德, 程烽雷. 聚氨酯-环氧复合改性沥青及其路用性能研究 [J]. 公路, 2016, 61 (8): 171-174.  
BU Xin-de, CHEN Feng-lei. Research on Performance of Polyurethane-epoxy Resin Compound Modified Asphalt and Its Mixture [J]. Highway, 2016, 61 (8): 171-174.
- [17] 王火明, 李汝凯, 王秀, 等. 多孔隙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 Huo-ming, LI Ru-kai, WANG Xiu, et al. Strength and Road Performance for Porous Polyurethane Mixture [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (10): 24-31.
- [18] 王统井. 高耐久聚氨酯铺面材料的设计与制备 [D]. 上海: 同济大学, 2018.  
WANG Tong-jing. Design and Preparation of High Durable Polyurethane Pavement Material [D]. Shanghai: Tongji University, 2018.
- [19] 王火明, 李汝凯, 张东长, 等. 聚氨酯碎石混合料路用性能与工程应用 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.  
WANG Huo-ming, LI Ru-kai, ZHANG Dong-chang, et al. Road Performance and Engineering Application of Porous Polyurethane Mixture [M]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [20] 孙铭鑫. 聚氨酯空隙弹性路面混合料的性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.  
SUN Ming-xin. Research on Performance of Polyurethane Porous Elastic Pavement Mixture [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [21] 孙帅. 聚氨酯橡胶颗粒混合料自应力除冰雪应用研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.  
SUN Shuai. Applied Study on Eliminating Snow by Self-stress of Polyurethane Rubber Particle Mixture [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [22] WANG D W, LIU P F, LENG Z, et al. Suitability of PoroElastic Road Surface (PERS) for Urban Roads in Cold Regions: Mechanical and Functional Performance Assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 1340-1350.
- [23] 张恒, 罗成平. 聚氨酯稳定橡胶颗粒混合料除冰性能研究 [J]. 中外公路, 2017, 37 (2): 259-262.  
ZHANG Heng, LUO Cheng-ping. Study on Deicing Performance of Polyurethane Stabilized Rubber Particle Mixture [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (2): 259-262.
- [24] 肖庆一, 刘美彤, 王玉宝, 等. 聚氨酯稳定橡胶颗粒新型路面材料除冰雪机理分析 [J]. 中外公路, 2015, 35 (4): 258-261.  
XIAO Qing-yi, LIU Mei-tong, WANG Yu-bao, et al. Analysis on Mechanism of Removing Ice and Snow of New Pavement Material with Polyurethane Stabilized Rubber Particles [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35 (4): 258-261.
- [25] WANG D W, SCHACHT A, LENG Z, et al. Effects of Material Composition on Mechanical and Acoustic Performance of Poroelastic Road Surface (PERS) [J]. Construction & Building Materials, 2017, 135: 352-360.
- [26] 程诚. 道路噪声测量与评价方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011.  
CHENG Cheng. Research of Road Noise Measurement and Evaluation Method [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.