

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.061

# 聚氨酯混合料与沥青混合料路用性能评价对比

黎小顺

(广东省交通规划设计研究院股份有限公司,广东 广州 510507)

**摘要:**随着车流量与车辆荷载的不断增大,道路工程建设中对道路材料的要求也逐步提高。除了普通改性沥青外,人们开始关注非沥青材料在路面材料中的应用。其中,聚氨酯材料受到广泛关注。该文通过肯塔堡飞散试验、冻融劈裂试验、低温小梁弯曲试验、车辙试验、抗滑试验与四点小梁弯曲试验对比了基质沥青、SBS改性沥青与5种不同配比的聚氨酯混合料的路用性能。试验结果表明:含有合适比例异氰酸酯的聚氨酯混合料的抗松散、低温抗裂、抗水损、抗车辙及抗滑性能均优于传统沥青混合料,更适合于高温重载交通路面。异氰酸酯比例较高的聚氨酯混合料的抗剥落性能、强度与抗滑性能较好。

**关键词:**聚氨酯混合料;异氰酸酯;路用性能;对比分析

## 1 引言

随着越来越多的沥青路面建成使用,路面养护的工作量越来越大。据统计,在“十二五”期间,约18万km国道、省道路面需要进行大、中修养护,每年工程费用约为1000亿元。保存性养护是一个新概念,是通过加设罩面层实现对原有道路结构性的保护,不仅仅是预防性养护仅对路面使用功能性提升,而且能够保证路面结构损坏出现的时间往后延长5~10年,大大节省道路全寿命建设养护费用。应用于保存性养护的道路材料需满足耐久性强、各项路用性能指标突出的要求。随着道路改性材料的推广,一些非沥青材料也逐步应用到道路行业中。

聚氨酯甲酸酯(简称聚氨酯 polyurethane,英文缩写PU)是一种新型高分子合成材料。聚氨酯的研究开发最初是Otto Bayer等于1937年在德国勒沃库森的I.G. Farben实验室开始。经过80多年的发展,聚氨酯现已成为世界上6大合成材料之一。半个多世纪以来迅速用于制造纤维、胶黏剂、铺装材料等,目前已广泛应用于交通、建筑等领域。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,与传统沥青胶结料相比,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。聚氨酯胶结料的黏结强度高,也适合制成大孔隙混合料,在具有快速排水功能的同时也拥有良好的力学性能。这种路

面材料正符合中国“海绵城市”的发展理念,对缓解中国城市内涝,提升城市生态环境都有积极作用。此外,聚氨酯胶结料为水性材料,无毒环保,并可实现常温拌和。综上所述,将聚氨酯应用于道路保存性养护,将具有较为理想的养护效果。

目前已有较多关于聚氨酯改性沥青及混合料性能方面的研究。吕文江等对聚氨酯改性沥青的制备工艺进行了研究,向基质沥青中加入聚氨酯预聚体,确定了其最佳掺量。并对聚氨酯改性沥青混合料与常见沥青混合料的高温稳定性与水稳定性进行了对比评价。结果表明:聚氨酯改性沥青混合料的高温稳定性与低温抗裂性能均明显优于SBS改性沥青混合料;舒睿研究了制备温度、时间对聚氨酯改性沥青性能的影响,也对聚氨酯改性沥青混合料与其他改性沥青混合料的各项路用性能进行了对比分析;祁冰将聚氨酯改性沥青应用于桥面铺装,以改善钢桥面变形大的问题。选用两种不同类型的聚氨酯树脂对基质沥青进行改性,通过拉伸试验、离析试验、荧光显微镜试验分析及布式黏度试验分别确定了两种聚氨酯改性沥青中各组分的最佳掺量及固化温度,并通过一系列室内试验对两种聚氨酯改性沥青混合料的强度及路用性能进行了研究。综合目前的研究现状,可以看出:关于聚氨酯材料在道路工程领域的应用研究中,大多数研究是将聚氨酯材料作为掺量较高的添加剂加入到沥青中对其改性,而针对将纯聚氨酯作为胶结料制备道路混合料的研究相对较少。

收稿日期:2020-11-19(修改稿)

作者简介:黎小顺,男,工程师。E-mail:185659067@qq.com

聚氨酯材料主要由多元醇(柔性链)和多异氰酸酯(刚性链)组成,多异氰酸酯和多元醇通常占到聚氨酯组成的80%以上,两种原料的性能对聚氨酯性能影响较大。聚氨酯树脂原料品种较多,导致聚氨酯材料的多样化,应用广泛,这是聚氨酯树脂的一大特色,它可以通过调整异氰酸酯与多元醇种类和分子量来制备不同硬度和弹性的聚氨酯材料。

综上所述,聚氨酯黏合剂在铺面工程领域内的使用仍然具有较大研究空间。关于将聚氨酯作为单一胶结料制备道路混合料并测试性能的研究还相对较少,且关于不同多元醇和多异氰酸酯比例对于其性能的影响,也缺少较为全面的道路试验来进行评价。该文通

过试验对比聚氨酯混合料和沥青混合料的路用性能,包括抗松散性能、低温抗裂性能、高温稳定性能与抗滑性能,探究不同多元醇和多异氰酸酯比例对其性能造成的影响,为聚氨酯材料在道路工程领域的应用与设计研发提供一定参考。

## 2 试验材料与试验方案

### 2.1 试验材料

胶结材料包括70#基质沥青、4.5% SBS改性沥青以及5种不同配比的聚氨酯。其中,沥青的技术指标如表1所示。

表1 沥青技术指标

项目	单位	70# 基质沥青	4.5% SBS 改性沥青	检测方法
针入度(25℃, 100 g, 5 s)	0.1 mm	76	55	T0604—2011
延度	cm	>100(15℃)	28(5℃)	T0605—2011
软化点	℃	49.3	68.5	T0606—2011

测试原料聚氨酯由巴斯夫聚氨酯特种产品(中国)有限公司提供,在原聚氨酯配方基础上进行改进,共提供5种不同配方样品,聚氨酯-1~聚氨酯-5中,多元醇与异氰酸酯的比例分别为100:40、100:50、100:60、100:70、100:80。

此外,采用由巴斯夫聚氨酯特种产品(中国)有限公司生产的环保型固化剂JB-1与催化剂,固化剂与聚氨酯的质量比为4:10,催化剂与聚氨酯的质量比为1:80。

### 2.2 聚氨酯混合料制备方法

高分子聚合物的化学反应速度与反应温度有关。聚氨酯固化反应速度与反应温度成指数关系,随温度的上升,聚氨酯会快速固化。因此,为保证充裕的反应时间,制备采用冷拌形式,不对石料或者搅拌机进行加热,在室温条件下制备。需要注意的是,由于聚氨酯预聚体较活泼,容易与水分发生反应产生二氧化碳,影响体积稳定性,因此,对粗、细集料及填料需在使用前充分干燥,待自然冷却后使用。

由于聚氨酯早期无法提供足够黏结力,单面击实50次后,如果翻面重新计时,则原先压实部分的石料将会在翻转过程中重新散开,失去前期压实效果。因此,聚氨酯采用单面击实。

击实完成后,聚氨酯尚不能提供足够的黏结力,若按照有关沥青规范,立即去除底座侧放将会导致沥青

混合料散落。为保证聚氨酯混合料具备充足的固化时间,借鉴水泥混凝土养生方案,将聚氨酯混合料在模底座中静置固化24 h后再取出。

### 2.3 试验方案

#### 2.3.1 肯塔堡飞散试验及浸水肯塔堡飞散试验

按标准击实法成型马歇尔试件,待强度形成后,将试件分为两组:干燥组在20℃条件下养护7 d;浸水组在恒温水浴20℃条件下养护7 d。以此分别评价聚氨酯混合料在干燥与浸水条件下的抗松散性能。试验参照JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中T0733—2011进行,以飞散后试件的质量损失率作为评价其抗松散性能指标。

#### 2.3.2 冻融劈裂试验

冻融劈裂试验是一种常见的用来衡量材料低温抗裂性能的试验方法。根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中T0729—2000规定,加载速率采用50 mm/min,试件冻融前后各进行4次平行试验。对于3种聚氨酯混合料以及沥青混合料分别制作4组马歇尔试件。将其中1组试件按JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中T0729—2011进行制备。1组冻融循环为试件真空饱水后在-18℃冰箱中冷冻16 h,冷冻后立即放入60℃恒温水箱中保温24 h,随后放入20℃水中浸泡0.5 h。另2组不处理的试件在20℃条件下养生2 h以上

后进行试验。

### 2.3.3 低温弯曲试验

为进一步测量聚氨酯混合料在低温下的力学性能,按照沥青混合料弯曲试验规程进行,测定混合料在规定温度和加载速率时弯曲破坏的力学性质。将轮辙成型的试件切割成  $30\text{ mm}\times 35\text{ mm}\times 250\text{ mm}$  的小梁,跨径为  $200\text{ mm}$ ,试验温度为  $(-10\pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加载速率为  $50\text{ mm/min}$ 。试件加载装置为 MTS 万能试验机。

### 2.3.4 高温车辙试验

车辙试验是测试高温稳定性最常用的试验。其通过在恒温箱内施加加载造成永久变形,模拟高温下车辆行驶荷载对路面产生的车辙病害。按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中 T0719—2011 对聚氨酯混合料和沥青混合料进行车辙试验,分析对比其高温稳定性,其中试验温度设定为  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试件采用标准车辙试块: $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ,胎压为  $0.7\text{ MPa}$ 。车辙试验中,以动稳定度作为评价指标。

### 2.3.5 抗滑性能试验

抗滑性能是路面保证车辆行驶安全的最主要因素之一。路面表面的形貌在公路研究领域一般表述为路面构造。混合料抗滑性能主要分为宏观构造以及微观构造抗滑性能。宏观构造指由于粒径大小以及胶结料掺量、空隙率等因素影响而造成的路表不均匀程度,主要由骨料的形状、粒径、排列和空隙决定,受施工工艺、交通状况和使用时间的影响。微观构造则指与轮胎接触的集料表面的微观构造,集料顶部平滑的微观构造与胎面橡胶发生黏着摩擦,产生黏着摩擦力。微观构造主要由粗集料、胶结料膜厚度等因素决定。

由于聚氨酯混合料和沥青混合料级配以及石料类型相同,因此构造深度预计差距不大。因此,该文将主要通过测试摆值来比较两者的抗滑性能。首先成型  $300\text{ mm}\times 300\text{ mm}\times 50\text{ mm}$  的标准车辙板,然后在车辙试件上用摆式仪测定摩擦系数。测试方法遵循 JTG E60—2008《公路路基路面现场测试规程》中 T0964—2008 执行。在车辙板的同一个点上平行测定 3 次,取平均值作为该点的代表值。当路面温度为  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,测得的摆值为  $BPN_t$ ,按式(1)换算成  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的摆值  $BPN_{20}$ 。

$$BPN_{20} = BPN_t + \Delta BPN \quad (1)$$

式中: $BPN_{20}$  为换算成标准温度  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的摆值; $BPN_t$  为路面温度  $t$  时测得的摆值; $\Delta BPN$  为温度修正值,温度修正值按表 2 采用。

表 2 温度修正值

温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度修正 $\Delta BPN$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	温度修正 $\Delta BPN$
0	-6	25	2
5	-4	30	3
10	-3	35	5
15	-1	40	7
20	0		

### 2.3.6 疲劳性能试验

四点小梁弯曲疲劳试验(简称 4PB)用于评价沥青混合料的疲劳性能。按相关规范要求制备沥青混合料试件,并切割成尺寸为  $380\text{ mm}\times 63.5\text{ mm}\times 50\text{ mm}$  的四点小梁试件。4PB 试验中采用  $N_{fNM}$  法作为判断改性沥青疲劳破坏的标准。试验温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,加载频率为  $10\text{ Hz}$ ,应变为  $1\ 000\ \mu\epsilon$ 。每组试件 3 个平行样品。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 肯塔堡飞散试验

将基质沥青、4.5% SBS 改性沥青及不同多元醇与异氰酸酯比例的聚氨酯制成混合料,并进行未浸水与浸水条件下的肯塔堡飞散试验。不同种类混合料的肯塔堡飞散损失率对比如图 1 所示。

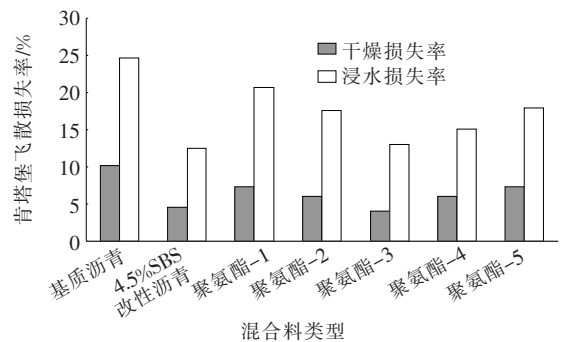


图 1 不同种类混合料的肯塔堡飞散损失率对比

由图 1 可得:未浸水组试件的飞散质量损失率均远远低于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  浸水 7 d 组的损失率,但无论浸水与否,不同混合料之间的对比排序基本一致。干燥条件下,不同混合料之间的抗飞散性能对比排序为:聚氨酯-3>4.5% SBS 改性沥青>聚氨酯-2>聚氨酯-4>聚氨酯-5>聚氨酯-1>基质沥青。浸水后的抗飞散性能对比排序为:4.5% SBS 改性沥青>聚氨酯-3>聚氨酯-4>聚氨酯-2>聚氨酯-5>聚氨酯-1>基质沥青。干燥与浸水条件下的飞散试验结果对比说明,聚氨酯混合料的抗松散及水损害性能明显优于基

质沥青,干燥条件下,经过合适配方调配的聚氨酯混合物料性能甚至能够优于4.5% SBS改性沥青。但总体而言,聚氨酯混合物料在抗松散性能方面的水敏感性高于SBS改性沥青。

对不同多元醇与异氰酸酯比例的聚氨酯混合物料进行比较,可以发现:随着异氰酸酯比例的上升,聚氨酯混合物料的抗松散性能呈现先上升后下降的趋势,当多元醇与异氰酸酯的比例为100:60时,无论是干燥条件还是浸水条件下的混合物料抗松散性能均为最佳。这说明,从聚氨酯混合物料抗松散性能考虑,多元醇与异氰酸酯存在着最佳配比。当异氰酸酯(刚性链)含量较高时,聚氨酯材料的交联度大、极性大、内聚能大,因此呈现出较强的抗飞散性能。但当异氰酸酯的比例过高(多元醇:异氰酸酯 $\geq$ 100:70)时,则会出现抗飞散性能下降的现象,分析认为是以下原因造成:①过量的异氰酸酯可能会加剧聚氨酯合成中副反应的过程,导致多元醇与异氰酸酯的有效反应不充分,减少了聚氨酯与石料的实际接触面积,从而降低了混合料的内聚性能;②当异氰酸酯比例较高时,聚氨酯材料的柔韧性较差、脆性较大,容易在外力的作用下产生裂纹。因此在试件成型压实过程中,有可能对试件内部造成损伤,导致其成型后的抗松散性能弱于异氰酸酯比例较低的聚氨酯混合物料。

### 3.2 冻融劈裂试验

利用冻融循环中水的冷冻膨胀造成聚氨酯膜的破坏效果。分别对试件进行冻融前后的劈裂强度测试,以表征其低温抗裂性能及抗水损性能。不同混合料的冻融劈裂试验结果如图2所示。

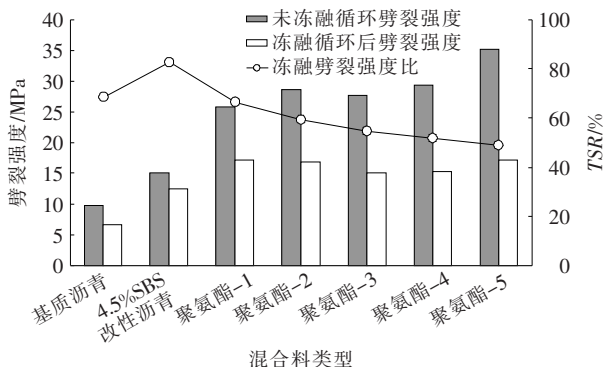


图2 不同种类混合料的冻融劈裂试验结果对比

由图2可以看出:无论经历冻融循环与否,各类混合料的劈裂强度对比均呈现出聚氨酯混合物料 $>$ 4.5% SBS改性沥青 $>$ 基质沥青的现象。其中,未经历冻融循环时,随着聚氨酯中异氰酸酯比例的增长,其混合物

料的劈裂强度呈逐步上升的趋势。而经历冻融循环后,聚氨酯混合物料的劈裂强度则会随着异氰酸酯比例的增长而呈下降趋势。从冻融劈裂强度比(TSR)这一指标来看,3类混合物料中,SBS改性沥青具有最优的抗水损害性能,低异氰酸酯比例的聚氨酯混合物料与基质沥青混合物料相近,而随着异氰酸酯比例的上升,聚氨酯混合物料的TSR指标逐步下降,说明其抗水损害性能逐渐衰减,水敏感性上升。分析产生这一现象的原因可能为:

(1)使用的5种聚氨酯胶结料玻璃化转变温度高,故在60℃水浴后也难以修复水分冻胀造成的聚氨酯膜破坏,产生的永久破坏导致聚氨酯混合物料试件抗裂强度有较大幅度的下降。

(2)当聚氨酯混合物料处于浸水、冻融循环的条件下,水会取代一部分多元醇与异氰酸酯进行反应,导致多元醇与异氰酸酯之间的有效反应不充分,降低了聚氨酯混合物料在浸水条件下的内聚黏结性,使得TSR指标下降。

但由图2可知:即使聚氨酯混合物料抗裂强度下降幅度大,但其强度绝对值相较于沥青混合物料仍比较大。通过3类混合物料冻融后劈裂强度对比可知,聚氨酯混合物料强度皆强于沥青混合物料。综合冻融循环前后的强度对比,认为多元醇与异氰酸酯的比例为100:50的聚氨酯-2类混合物料为最优选择。

### 3.3 低温弯曲试验

利用低温小梁弯曲试验测试试件的抗弯拉强度,以表征混合料的低温性能。不同混合料的低温弯曲试验结果如图3所示。

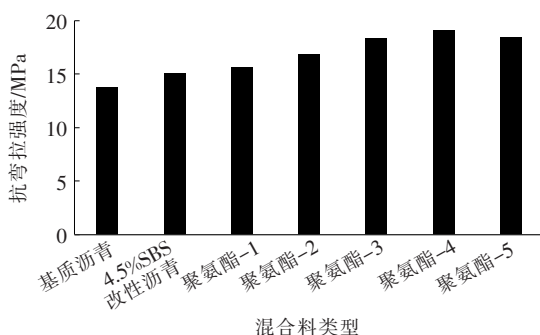


图3 不同种类混合料的低温弯曲小梁试验结果对比

由图3可知:不同聚氨酯混合物料的抗弯拉强度值均高于基质沥青混合物料与4.5% SBS改性沥青混合物料,说明相较于沥青混合物料,聚氨酯混合物料具有更优异的低温抵抗荷载能力。随着聚氨酯中异氰酸酯比例的增加,聚氨酯混合物料的低温性能逐步提高,但异氰酸酯

比例过高(多元醇与异氰酸酯的比例为 100 : 80)时,这种低温性能的提升效应开始减弱。

### 3.4 高温车辙试验

3 类沥青混合料高温车辙试验结果见图 4。

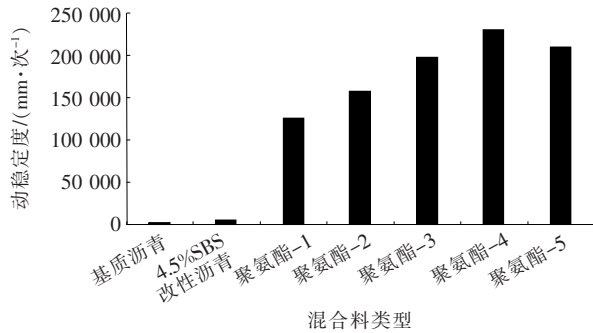


图 4 不同种类混合料的高温车辙试验结果对比

由图 4 可知:在同一级配同一掺量的情况下,聚氨酯混合料的高温稳定性显著优于沥青混合料,且观察试验后的试件可以发现:聚氨酯混合料基本无明显车辙现象。随着聚氨酯中异氰酸酯比例的增加,聚氨酯混合料的高温稳定性呈现逐步上升又下降的趋势。较高异氰酸酯比例(多元醇:异氰酸酯 $\geq 100:80$ )下混合料试件的高温稳定性出现下降的现象是因为试件脆性较大,可能在成型过程中内部就已有裂纹产生来解释。

由试验得到聚氨酯混合料具有优异的抗车辙性能,可预测得到聚氨酯胶结料在极端高温情况下仍能保持良好的性能。其不仅可以充分满足一般道路的使用要求,同时相较于沥青混合料,更适用于高温重载交通路面。

### 3.5 抗滑性能试验

为了测试并对比各类混合料在磨耗前后的抗滑性能,分别将车辙试验前的试件与经历 5 000 次车辙试验的试件进行抗滑性能测试,并将前后两次的试验结果进行对比,如图 5 所示。

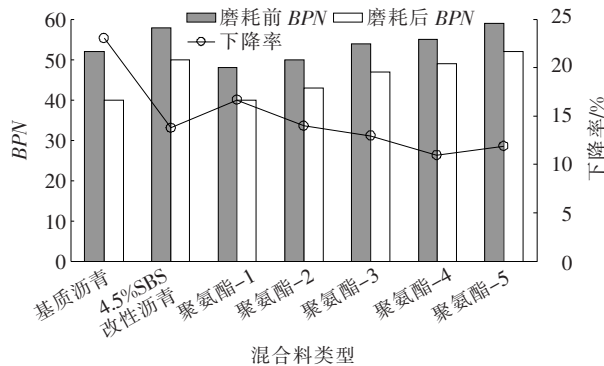


图 5 不同种类混合料的抗滑性能对比

由图 5 可知:总体上,3 类混合料中,4.5% SBS 改性沥青混合料的抗滑性能最佳。低异氰酸酯比例的聚氨酯混合料抗滑性能不佳,甚至不如基质沥青,而随着异氰酸酯比例的上升,其抗滑性能有明显提高。当异氰酸酯比例较高时,其抗滑性能达到甚至略微超过 4.5% SBS 改性沥青的抗滑水平。

经过 5 000 次车辙荷载碾压后,各类混合料的抗滑性能对比有所不同。聚氨酯类混合料抗滑性能在抗磨耗方面的优势体现出来。3 类混合料中,聚氨酯混合料磨耗后 BPN 值下降率最小,且异氰酸酯比例越大,BPN 值下降率越小。这是因为对于聚氨酯混合料来说,由于其与石料的黏结非常好,路表经轮胎长期磨损后,仍然会有一定厚度聚氨酯覆盖在石料表面,从而起到一定保护作用。因此,聚氨酯混合料的长期抗滑性能可能优于沥青混合料。并且通过对比可知,聚氨酯中异氰酸酯比例越大,抗滑性能与抗磨耗性能越好。

### 3.6 疲劳性能试验

对基质沥青混合料、4.5% SBS 沥青混合料以及 5 种聚氨酯混合料的小梁试件进行 4PB 疲劳试验,试验结果如图 6 所示。

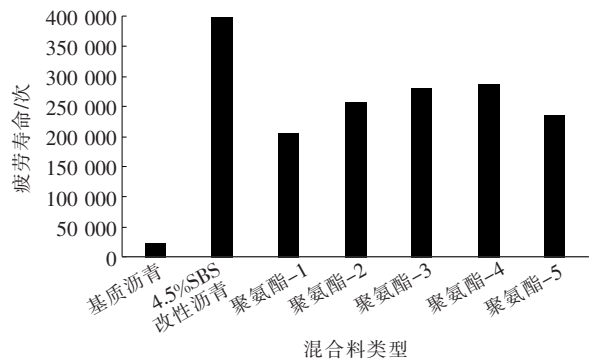


图 6 不同种类混合料的疲劳性能对比

由图 6 可以看出:3 类混合料的疲劳性能对比为:4.5% SBS 改性沥青 > 聚氨酯混合料 > 基质沥青混合料。相对于基质沥青混合料,聚氨酯混合料抵抗变形的能力显著提升,因此在反复荷载作用下,其内部出现裂纹的时间会延后。但由于聚氨酯材料与 SBS 改性沥青相比,其弹性性能较差,难以储存耗散外力所做的功,因此聚氨酯混合料较“脆”,尽管模量较高,但一旦出现微小裂纹,内部裂纹很容易迅速发展,最终导致疲劳破坏。

此外,随着聚氨酯中异氰酸酯比例的增加,聚氨酯混合料的疲劳性能呈现逐步上升的趋势,但当异氰酸

酯比例过高(聚氨酯-5)时,该类聚氨酯混合物料的疲劳性能有明显的下降。这种现象出现的原因可能在于混合物料的模量较高,在切割小梁试件过程中,可能已经受到外力导致试件内部出现裂纹,从而造成试验过程中疲劳破坏加速。

## 4 结论

该文对比了聚氨酯混合物料与基质沥青、SBS改性沥青混合物料在路用性能方面的差异,探究了不同配比下聚氨酯混合物料的性能。得出以下主要结论:

(1) 聚氨酯混合物料的抗松散及水损害性能明显优于基质沥青,干燥条件下,经过合适配方调配的聚氨酯混合物料性能甚至能够优于4.5% SBS改性沥青。但总体而言,聚氨酯混合物料在抗松散性能方面的水敏感性高于SBS改性沥青。异氰酸酯比例越大,聚氨酯混合物料的抗松散性能越佳,但其脆性也会增加,在压实过程中可能会对其强度有不利影响。

(2) 聚氨酯混合物料的低温抗裂性明显优于基质沥青与SBS改性沥青混合物料,且随着异氰酸酯比例的增长而上升。但经历冻融循环后,其劈裂强度下降幅度大,表明聚氨酯混合物料的抗水损性能欠佳。综合考虑劈裂强度与抗水损性,不同配方的聚氨酯混合物料中,多元醇与异氰酸酯的比例为100:50的聚氨酯-2类混合物料为最优选择。此外,低温弯曲梁试验结果也证明了聚氨酯混合物料的低温性能优于沥青混合物料。

(3) 聚氨酯混合物料具有优异的高温抗车辙性能,且基本随着异氰酸酯比例的增大而提高。相较于基质沥青与SBS改性沥青,聚氨酯混合物料更适用于高温重载交通路面。

(4) 低异氰酸酯比例的聚氨酯混合物料抗滑性能较差,但随着异氰酸酯比例的上升,其抗滑性能明显提高,较高比例异氰酸酯的聚氨酯混合物料的抗滑性能甚至略微超过4.5% SBS改性沥青。此外,聚氨酯混合物料的抗磨损性能优异,且随着异氰酸酯比例的增大而提升。

(5) 聚氨酯混合物料的疲劳性能明显优于基质沥青混合物料,但仍劣于4.5% SBS改性沥青混合物料。随着异氰酸酯比例的上升,聚氨酯混合物料抵抗疲劳荷载的能力也逐渐增强,但当异氰酸酯比例过高时,试件在切割过程中容易受到外力损伤,造成其疲劳性能下降。

## 参考文献:

- [1] 朱吕民. 聚氨酯合成材料[M]. 南京:江苏科学技术出版社,2002.
- [2] 朱长春,吕国会. 中国聚氨酯产业现状及“十三五”发展规划建议[J]. 环球聚氨酯,2016(5).
- [3] 吕文江,彭江,朱永彪. 聚氨酯改性沥青制备工艺及混合物料路用性能研究[J]. 公路,2020(3).
- [4] 舒睿. 聚氨酯改性沥青及其混合物料的性能研究[D]. 北京建筑大学硕士学位论文,2013.
- [5] 祁冰. 适用于桥面铺装的聚氨酯(PU)改性沥青及混合物料性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2018.
- [6] Liu Y. Polyurethane Resin and its Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2012.
- [7] Drobny JG. Thermoplastic Polyurethane Elastomers[J]. Handbook of Thermoplastic Elastomers,2014.
- [8] Choi J, Moon SD, Jang UJ, et al. Synthesis of Highly Functionalized Thermoplastic Polyurethanes and their Potential Applications[J]. Polymer,2017(116).
- [9] Theiler G, Wachtendorf V, Elert A, et al. Effects of UV Radiation on the Friction Behavior of Thermoplastic Polyurethanes[J]. Polymer Testing,2018(70).
- [10] Mckeen LW. Thermoplastic Elastomers: Fatigue and Tribological Properties of Plastics and Elastomers (Third Edition) [M]. Netherlands: Elsevier,2016.
- [11] 殷敬华,莫志深. 现代高分子物理学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [12] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合物料试验规程[S].
- [13] 聂忆华,胡静轩. 加拿大沥青改进测力延度试验(DENT)介绍[J]. 中外公路,2018(3).
- [14] 孟书涛,黄晓明,范要武,等. 沥青混合物料动稳定度试验的分析[J]. 公路交通科技,2005(11).
- [15] 邵腊庚,张仕,严二虎,等. 沥青结合料高温性能指标的研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [16] 黄卫东,吕伟民. 沥青及沥青混合物料流变性质与动稳定度的关系[J]. 同济大学学报(自然科学版),2000(4).
- [17] Rezaei A, Masad E, Chowdhury A. Development of a Model for Asphalt Pavement Skid Resistance Based on Aggregate Characteristics and Gradation[J]. Journal of Transportation Engineering,2011(12).
- [18] Wilson D, Dunn R. Polishing Aggregates to Equilibrium Skid Resistance[J]. Road & Transport Research Journal,2005(2).
- [19] 黄明,温学钧,黄卫东,等. 不同设计目标下沥青混合物料的疲劳性能[J]. 同济大学学报(自然科学版),2016(4).