

聚氨酯多孔弹性混合料水稳定性影响因素研究

孙晟凯, 汤 雄, 雷 俊, 刘 丽

(四川省交通建设集团股份有限公司, 成都 610000)

摘要:聚氨酯多孔弹性混合料(PPEM)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空隙率大、橡胶颗粒掺量高等特点。由于 PPEM 是大孔隙结构,使得雨天雨水易流入路面内部,进而引发水损害。为此,基于浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和浸水飞散试验,分别测试不同聚氨酯黏结剂、橡胶颗粒替换量、级配 3 种工况下 PPEM 的水稳定性。结果表明:对比分析不同聚氨酯黏结剂多孔弹性混合料,其中 PU-III 多孔弹性混合料水稳定性最好,PU-IV 多孔弹性混合料水稳定性最差;当橡胶颗粒替换量不断提高时,PPEM 的马歇尔残留稳定性和抗拉强度比呈线性增长,说明橡胶颗粒对 PPEM 水稳定性的提高有促进作用;PPEM 所用级配的空隙率与其水稳定性呈负增长,水稳定性随空隙率增大而减小。

关键词:道路工程;聚氨酯;橡胶颗粒;多孔弹性混合料;水稳定性

中图分类号:U414 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)04-0315-05

随着海绵城市、宁静路面建设理念不断推广,对道路功能性和舒适性的要求逐渐提高,具有排水、降噪等功能的聚氨酯多孔弹性路面逐渐被应用到城市道路中^[1-2]。聚氨酯多孔弹性混合料由聚氨酯黏结剂、橡胶颗粒和石料拌和而成^[3],相较于普通沥青混合料具有空隙率大、橡胶颗粒掺量高等特点^[4-5]。由于聚氨酯多孔弹性混合料空隙率较大,使得雨天雨水易流入路面内部,进而引发水损害^[6-7]。现有研究主要集中于聚氨酯混合料的路用性能。Torzs 等^[8]使用聚氨酯代替传统的沥青作为一种新型黏合剂与混合物相拌,发现聚氨酯用量为 5% 左右时,混合料具有较好的抗压、抗拉和抗弯性能,但是水稳定性较差。Sun 等^[9-10]针对聚合物改性沥青贮存稳定性差、易离析、水损害等问题,制备出了聚氨酯改性沥青对其改性机理进行了研究,发现聚氨酯改性沥青高温性能优于普通 SBS 改性沥青,但水稳定性并没有得到改善。舒睿等^[11]研究了单组分聚氨酯材料微观性能以及聚氨酯与混合物之间的相互联系,随后对路用性能进行测试,结果显示,聚氨酯混合料高低温性能十分显著,但水稳定性能并不理想。孙铭鑫^[12]选择聚氨酯作为黏结剂和大孔隙结构,研究了聚氨酯混合料的路用性能和降噪性能,结果发现该混合料具有出色的高温稳定性和低

温抗裂性,但水稳定性略待提高。

综上所述,聚氨酯多孔弹性混合料存在水稳定性较差等问题,但较少涉及聚氨酯种类、橡胶颗粒替换量、级配等因素对多孔弹性混合料水稳定性的影响研究^[13-14]。为此,本文基于浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和浸水飞散试验,分别测试了不同聚氨酯黏结剂、橡胶颗粒替换量、级配 3 种工况下聚氨酯多孔弹性混合料的水稳定性。

1 原材料

选取 5 种道路工程常用的聚醚型单组分聚氨酯黏结剂,分别命名为 PU-I、PU-II、PU-III、PU-IV、PU-V,其技术指标见表 1。5 种聚氨酯具有较好的黏附性、抗腐蚀性和较高的强度,适用于道路工程中。

表 1 聚氨酯技术指标

名称	颜色	密度/%	黏度(25℃)/ (mPa·s)	固化 时间/d
PU-I	无色透明	1.07	2 400	3~4
PU-II	淡黄色	1.24	1 633	2~3
PU-III	淡黄色	1.13	1 860	2~3
PU-IV	深黄色	0.96	1 240	3
PU-V	白色	1.15	2 130	4

收稿日期:2021-11-15

作者简介:孙晟凯(1995—),男,河南平顶山人,四川省交通建设集团股份有限公司,助理工程师,道路工程硕士,研究方向为路面新型材料。

常用的石料有花岗岩、石灰岩和玄武岩。其中玄武岩的磨光值最大,与聚氨酯胶黏剂的吸附性好^[15-16]。为此本文采用玄武岩集料制备聚氨酯多孔弹性混合料,其力学参数见表 2。

表 2 石料技术指标

技术指标	试验结果	规范	试验方法
压碎值/%	24	<26	T0316
磨耗值/%	25	<28	T0317
软石含量/%	1.5	<3	T0310
吸水率/%	1.3	<2	T0304
坚固性/%	10	<12	T0314
针片颗粒含量/%	10	<15	
粒径>9.5 mm/%	8	<12	T0312
粒径<9.5 mm/%	11	<18	

橡胶颗粒是聚氨酯多孔弹性混合料最主要的成分,其粒径大小、粗糙程度等特征对混合料有重要的影响^[17]。为了使橡胶颗粒与混合料之间更好地融合,采用等体积置换的方法代替部分石料。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 橡胶技术指标

表观密度/(g/cm ³)	邵尔硬度/%	弹性模量/MPa
1.23	73	11.7

2 试验方法

本文采用浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验和肯塔堡飞散试验评价聚氨酯多孔弹性混合料的水稳定性^[18]。

2.1 浸水马歇尔试验

该试验需要对两组样品进行测试,然后将它们进行对比。具体试验步骤为将两组样品存置在一定温度的水箱中,温度设定为 60℃,第 1 组样品保温时间为 40 min,测试其马歇尔稳定度(MS₀);第 2 组样品保温时间为 2 d,测试其马歇尔稳定度(MS₁),马歇尔残留稳定度(MSR)根据式(1)求得。

$$MSR=\frac{MS_0}{MS_1}$$

(1)

表 4 PAC-13-II 级配组成设计

集料类型	玄武岩集料										矿粉	油石比/%
筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	3	4.5
通过率/%	100	95	55.5	28	18	8	6	5	4	3		
质量比/%	0	5	39.5	27.5	10	10	2	1	1	1		

由图 1、图 2 可以看出,PU-III 多孔弹性混合料的 MSR 和 TSR 在 5 种聚氨酯混合料中为最大值,质量损失率 R_m 在 5 种聚氨酯混合料中为最小值。其马歇尔残留稳定度和冻融劈裂强度比分别达到

式中:MS₀ 为浸水 40 min 后的稳定度,kN;MS₁ 为浸水 48 h 后的稳定度,kN;MSR 为马歇尔稳定度,%。

2.2 冻融劈裂试验

该试验需要对两组样品进行测试。第 1 组置于室温下进行存放;将第 2 组样品采用饱水试验方法在(98±0.7) kPa 真空下储存;随后在样品表面喷洒一层清水,采用密封的袋子将样品进行包裹后放入零下 18℃冰库中维持 16 h;最后将样品放入 60℃水箱中储存 1 d。采用稳定度试验仪进行试验,抗拉强度比(TSR)按式(2)计算。

$$TSR=\frac{R_0}{R_{FT}}$$

(2)

式中:R₀ 为无冻融循环试样的抗拉强度,kN;R_{FT} 为一次冻融循环后试样的抗拉强度,kN;TSR 为抗拉强度比,%。

2.3 浸水飞散试验

该试验是将成型的样品在 60℃温度的水箱中存置 2 d,然后将样品取出后在常温下存置 1 d,最后在磨耗仪中进行 300 次旋转。试验前后分别测定了马歇尔试件的初始质量和最终质量。质量损失可用于表征混合物的水稳定性,其计算公式为

$$R_m=\frac{m_0-m_1}{m_0}$$

(3)

式中:m₀ 为初试质量,kg;m₁ 为最终质量,kg;R_m 为质量损失率,%。

3 聚氨酯混合料水稳定性分析

3.1 不同聚氨酯种类对混合料水稳定性的影响规律

为探究不同聚氨酯黏结剂对多孔弹性混合料水稳定性影响情况,本文采用 5 种不同的聚醚性单组分聚氨酯黏结剂(PU-I、PU-II、PU-III、PU-IV、PU-V),采用 PAC-13-II 级配通过等体积替换 20% 的橡胶颗粒后进行测试。级配见表 4。水稳定性试验结果如图 1、图 2 所示。

了 87.4% 和 81.5%,相较于 PU-IV 多孔弹性混合料分别增加了 8.1% 和 13.2%。浸水飞散试验的质量损失为 2.6%,相较 PU-IV 多孔弹性混合料降低了 9.2%。说明 PU-III 多孔弹性混合料水稳定性最

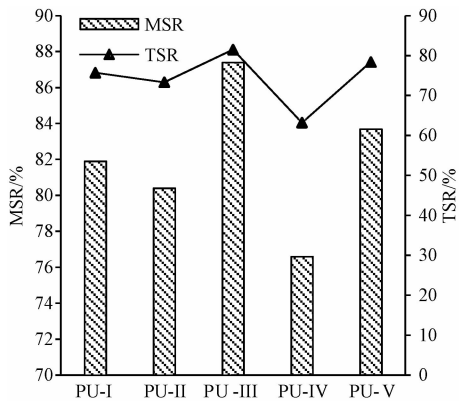


图 1 不同聚氨酯黏结剂对 MSR 和 TSR 的影响

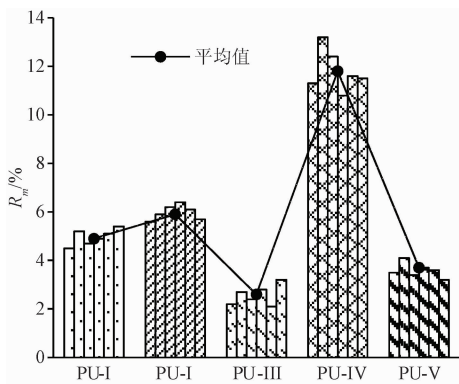


图 2 不同聚氨酯黏结剂对 R_m 的影响

好,PU-IV 多孔弹性混合料水稳定性最差。这是因为 PU-IV 聚氨酯黏结剂的黏结力较低,与石料和橡胶颗粒黏附性较差,导致其水稳定性较弱。因此在实际工程当中聚氨酯结合料的比选尤为重要,黏结力高的聚氨酯其混合料的水稳定性能较好。

3.2 不同橡胶颗粒替换量对聚氨酯多孔混合料水稳定性的影响规律

为探究橡胶颗粒对聚氨酯多孔弹性混合料水稳定性影响情况,本文以 PU-III 型聚氨酯黏结剂和 PERS 级配为研究对象,将橡胶颗粒筛分为 1.18~2.36 mm、2.36~4.75 mm 后与石料进行等体积替换,体积替换比分别为 0%、12.5%、25%,研究不同橡胶颗粒替换量对聚氨酯多孔混合料水稳定性的影响。PERS 级配见表 5。试验结果如图 3、图 4 所示。

表 5 PERS 级配组成设计

集料类型	玄武岩集料					油石比/%
筛孔尺寸/mm	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	4.5
百分数/%	5.2	23.1	46.7	13.8	11.2	

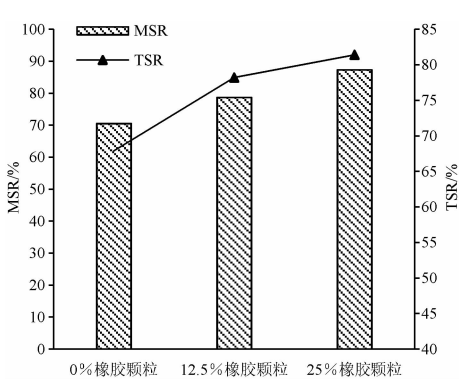


图 3 不同橡胶颗粒替换量对 MSR 和 TSR 的影响

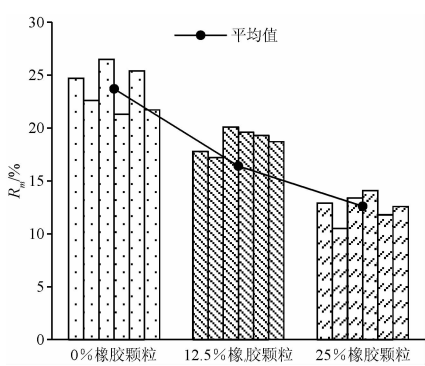


图 4 不同橡胶颗粒替换量对 R_m 的影响

由图 3、图 4 可以看出,随着橡胶颗粒替换量的增加,聚氨酯多孔弹性混合料 MSR 和 TSR 逐渐增大,浸水飞散试验的质量损失 R_m 近似线性减小。当橡胶颗粒替换量达到 25% 时,其 MSR 和 TSR 分别达到了 87.3% 和 81.4%。较未掺加橡胶颗粒状态下分别提高了 16.8% 和 13.5%。橡胶颗粒替换量达到 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 14.7%。说明橡胶颗粒的加入提高了聚氨酯多孔弹性混合料的水稳定性,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。此外当橡胶颗粒掺量达到 25%,聚氨酯多孔弹性混合料 R_m 平均值只有 12.6%,完全满足规范要求。解决了大孔隙结构抗飞散性较差的问题,说明聚氨酯多孔弹性混合料抗飞散性能更好。

3.3 不同级配对聚氨酯多孔弹性混合料水稳定性的影响规律

为探究不同级配对聚氨酯多孔弹性混合料水稳定性影响,本文采用 PU-III 型聚氨酯黏结剂替换 0% 橡胶颗粒后对 PERS、PAC-13-I、PAC-13-II、OGFC 四种不同级配进行浸水马歇尔试验、冻融劈

裂试验和浸水飞散试验。PAC-13-II 见表 3,PERS 见表 4,PAC-13-I 和 OGFC 见表 6、表 7。通过测量得到 PERS 平均空隙率为 25%,PAC-13-I 平均空隙

率为 19%,PAC-13-II 平均空隙率为 17%,OGFC 平均空隙率为 15%。具体水稳定性试验结果如图 5、图 6 所示。

表 6 PAC-13-I 级配组成设计

集料类型	玄武岩集料										矿粉	油石比/%
筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	4.8	4.5
通过率/%	100	94.8	55.7	17.4	13.4	11.8	9.1	7.4	5.9	4.8		
质量比/%	0	5.2	39.1	38.3	4	1.6	2.7	1.7	1.5	1.1		

表 7 OGFC 级配组成设计

集料类型	玄武岩集料										矿粉	油石比/%
筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	4	4.5
通过率/%	100	95	70	21	16	12	9.5	7.5	5.5	4		
质量比/%	0	5	25	49	5	4	2.5	2	2	1.5		

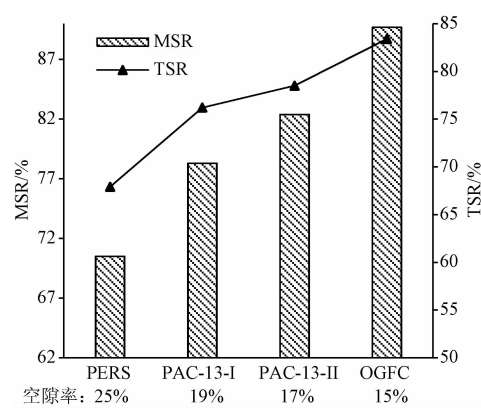


图 5 不同级配对 MSR 和 TSR 的影响

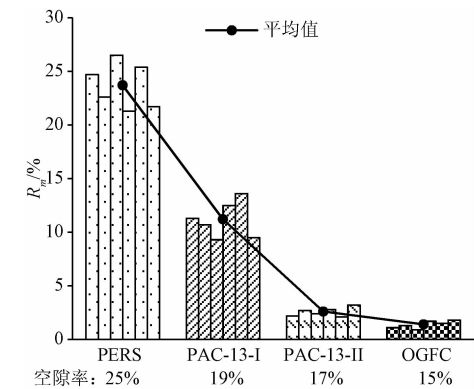


图 6 不同级配对 R_m 的影响

从图 5、图 6 可以看出,不同级配的聚氨酯多孔弹性混合料 TSR 和 MSR 有很大差异。其中空隙率最小的是 PERS 级配,其 MSR 和 TSR 分别为 70.5% 和 67.9%,相较于 OGFC 级配分别下降了 19.2% 和 15.5%。浸水飞散试验的质量损失 R_m 为 23.7%,相较于 OGFC 级配增加了 22.3%。说明掺加细集料有利于提高聚氨酯混合料的水稳定性。PERS 级配的

水稳定性最差,这是因为当进行冻融劈裂试验时混合料内部结构容易变形,导致强度和稳定性降低。在磨耗仪的滚筒内进行飞散时,大部分集料都比较容易脱落。在实际工程当中应控制空隙率大小,从而保证道路的水稳定性,防止路面发生水损害。

4 结论

- 1)由 5 种不同聚氨酯材料的水稳定性试验结果可以看出,PU-III 聚氨酯多孔弹性混合料水稳定性最好,PU-IV 混合料水稳定性最差。在实际工程当中应比选不同聚氨酯黏结剂,改善路面的水稳定性。
- 2)当橡胶颗粒替换量不断增多时,聚氨酯多孔弹性混合料的 MSR 和 TSR 呈线性增长,飞散损失 R_m 有不同程度的降低,说明橡胶颗粒对聚氨酯多孔弹性混合料水稳定性的增长有促进作用。
- 3)PAC-13-I、PAC-13-II 和 OGFC 级配的聚氨酯多孔弹性混合料 MSR 和 TSR 高于 PERS,且所用级配的空隙率与其水稳定性负增长,说明细集料的加入有利于提高聚氨酯多孔弹性混合料的水稳定性。为满足路用性能的同时保证混合料具有较大的空隙率,因此本文推荐选择 PAC-13-I 级配制备聚氨酯多孔弹性混合料。

参考文献

[1] LI L,LI J,LI Y L. Performance study of polyurethane/silicon carbide composite repairing asphalt pavements[J]. Journal of Polymer Engineering,2014,34(4):369-377.

[2] 孙英潮. 严寒地区高速铁路混凝土基床聚氨酯保温特性试验研究[J]. 科技和产业,2021,21(2):238-242.

[3] LIU M,HAN S,SHANG W. New polyurethane modified coating for maintenance of asphalt pavement potholes in winter-rainy condition[J]. Progress in Organic Coatings, 2019,133:368-375.

[4] 王火明,李汝凯,王秀. 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(10):28-35.

[5] 全玓朔. 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.

[6] BAZMARA B,TAHEKSIMA M,BEHKAVAN A. Influence of thermoplastic polyurethane and synthesized polyurethane additive in performance of asphalt pavements[J]. Construction and Building Materials,2018,166:1-11.

[7] VENNAPUSA,P K P,ZHANG Y,WHITE D J. Comparison of pavement slab stabilization using cementitious grout and injected polyurethane foam[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities,2016,30(6).

[8] TORZS T,LU G,MONTEIRO A O. Hydraulic properties of polyurethane-bound permeable pavement materials considering unsaturated flow[J]. Construction and Building Materials,2019,212:422-430.

[9] SUN M,ZHENG M L,BI Y F. Modification mechanism and performance of polyurethane modified asphalt [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2019,19(2):49-58.

[10] SUN M,ZHENG M L,QU G Z. Performance of polyurethane modified asphalt and its mixtures[J]. Construction and Building Materials,2018,191:386-397.

[11] 舒睿,张海燕,曹东伟. 聚氨酯改性沥青混合料性能的研究[J]. 公路交通科技,2015,11(12):142-144.

[12] 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.

[13] 李添帅,陆国阳,王大为. 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):162-173.

[14] LU G Y,LI T S,WANG D W. Experimental study on the polyurethane-bound pervious mixtures in the application of permeable pavements [J]. Construction and Building Materials,2019,202:838-850.

[15] CHEN J,YIN X J,WANG H. Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement[J]. Journal of Cleaner Production,2018,188:12-19.

[16] ZHOU W,HUANG X M,WANG L B. Study on the void reduction behaviour of porous asphalt pavement based on discrete element method[J]. Journal of Pavement Engineering,2017,18(4):285-291.

[17] 王立志,贾致荣,付鲁鑫,等. 排水性聚氨酯稳定再生集料最佳胶石比与组分比[J]. 科学技术与工程,2019,19(16):351-356.

[18] 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.

Study on the Influencing Factors of Water Stability of Polyurethane Porous Elastic Mixture

SUN Shengkai, TANG Xiong, LEI Jun, LIU Li

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

Abstract: Polyurethane porous elastic mixture (PPEM) is composed of polyurethane adhesive, rubber particles and aggregate. Compared with ordinary asphalt mixture, PPEM has the characteristics of large void ratio and high content of rubber particles. Because the PPEM is a macroporous structure, the rainwater is easy to flow into the pavement in rainy days, and then cause water damage. Based on the immersion Marshall test, freeze-thaw split test and immersion dispersion test, the water stability of polyurethane mixture under three conditions of different polyurethane binder, different rubber particle content and different gradation was tested. The results show that the water stability of porous elastic mixture with different polyurethane binder is compared, PU-III porous elastic mixture has the best water stability and PU-IV porous elastic mixture has the worst water stability. With the increase of rubber particle replacement amount, Marshall residual stability and freeze-thaw splitting strength ratio of PPEM increase gradually, which shows that the addition of rubber particle is beneficial to improve water stability of PPEM. The correlation between the void fraction of the gradation used in PPEM and its water stability is negative, the water stability decreases with the increase of the void fraction.

Keywords: highway engineering; polyurethane; rubber particles; porous elastic mixture; water susceptibility