

掺入聚氨酯脲的沥青混合料性能研究

赵炜诚

(上海浦东建设股份有限公司, 上海市 200126)

摘要: 研究探讨聚氨酯脲(PUU)作为新型改性材料在沥青路面工程中的应用效果,重点分析了其在SMA-13沥青混合料中替代传统填料的可行性。通过设计不同配比的聚氨酯脲、矿粉、木质素纤维复合改性方案,采用马歇尔试验、车辙试验、低温弯曲试验等测试方法,全面评估了混合料的高低温性能及水稳定性等关键指标。结果表明:当采用聚氨酯脲替代矿粉时,混合料的高低温性能及水稳定性满足规范要求;但聚氨酯脲的掺量对混合料性能具有显著影响,过量添加会导致沥青混合料性能衰减。建议在实际工程中控制聚氨酯脲掺量。验证了聚氨酯脲作为填料在沥青混合料中的适用性,为绿色环保型沥青路面的材料设计与施工提供了支撑。

关键词: 聚氨酯脲; 沥青混合料; SMA-13; 矿粉替代; 纤维替代; 吸油率

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0328-04

Study on Performance of Asphalt Mixtures Mixed with Polyurethane Urea

ZHAO Weicheng

(Shanghai Pudong Construction Co., Ltd., Shanghai 200126, China)

Abstract: The application effects of polyurethane urea (PUU) as a new modified material in asphalt pavement engineering are studied and discussed. Its feasibility of its substitution for traditional fillers in SMA-13 asphalt mixture is analyzed emphatically. By designing the composite modification schemes with varying proportions of PUU, mineral powder, and lignin fiber, and using the test methods such as Marshall test, wheel tracking test and low-temperature bending test, the key indicators of the high-temperature and low-temperature properties and water stability of the mixture are completely evaluated. The results demonstrate that when PUU replaces the mineral powder, the high-temperature and low-temperature performances and water stability of the mixture meet the standard requirements. However, the PUU content significantly influences the mixture properties. The excessive addition can lead to the degradation of asphalt mixture performance. Therefore, it is recommended to control the PUU content in the practical engineering applications. The suitability of PUU as a filler in asphalt mixtures is verified, which provides the support for the material design and construction of green and environmentally friendly asphalt pavements.

Keywords: polyurethane urea; asphalt mixture; SMA-13; mineral powder replacement; fiber replacement; oil absorption rate

0 引言

聚氨酯是一种由异氰酸酯与氨基化合物反应生成的高分子聚合物,具有优异的力学性能、耐磨性、耐候性和黏结性。近年来,聚氨酯材料作为一种新型沥青改性剂,在沥青混合料路面中的应用逐渐受到关注^[1-6]。相关研究表明,聚氨酯材料在沥青混合料中的应用及其性能改善效果,不少文献从不同角度探讨了聚氨酯改性沥青的制备、性能评价及其在

道路工程中的应用潜力,包括:聚氨酯改性沥青的制备工艺及其混合料的路用性能、高温条件下聚氨酯改性沥青及其混合料的性能表现、高性能聚氨酯改性沥青薄层罩面的设计优化等^[7-14]。

科思创聚氨酯脲(PUU)作为聚氨酯原料的副产品,目前其处理方法多为焚烧或做为填料在板材和跑道中应用。通过其在沥青混合料中的应用,可拓宽聚氨酯原料副产品在道路应用中循环再利用渠道,更可延长聚氨酯脲产品生命,减少生产企业的碳排放,保护环境。该种材料外观为黑色细粉颗粒,具有耐高温特点,其分解温度超400℃,其高吸油率特点类似沥青混合料中矿粉和纤维的特性,赋予其替

收稿日期: 2025-03-28

作者简介: 赵炜诚(1977—),男,博士,高级工程师,从事市政和建筑工程施工管理工作。

代矿粉和纤维的可能性;且该种化工副产品材料具有价格低、产量可靠、质量稳定的特点,上述特性为其在沥青混合料中的应用提供支撑。本研究旨在评估聚氨酯脲在沥青混合料中的适用性,特别是其在 SMA-13 沥青混合料中替代矿粉和纤维的潜力。

1 实验材料和试验方法

1.1 实验材料

本文采用的改性沥青为 I-D 型 SBS 改性沥青,SBS 改性沥青的性能指标见表 1,聚氨酯脲为粉末状,其性能指标见表 2,聚氨酯脲粉末的筛分指标见表 3。

表 1 沥青的基本性能指标

沥青类型	测试指标	温度	测试结果
SBS 改性沥青	延度/cm	5 °C	33.5
	针入度/0.1 mm	25 °C	42
	软化点/°C	—	82.1

1.2 试验方法

本文结合 SMA-13 配合比设计,设计了 6 种不同

表 4 聚氨酯脲替代方案的试验参数

序号	替代方案	聚氨酯脲掺量/%	矿粉掺量/%	纤维掺量/%	沥青油量/%	级配特点
级配 1	①对比样	0	13.0	0.30	5.9	标准 SMA 级配
级配 2	②半替代矿粉-半纤维	6.5	6.5	0.15	5.9	标准 SMA 级配
级配 3	③全替代矿粉-无纤维	13.0	0	0	5.9	标准 SMA 级配
级配 4	④半替代矿粉-无纤维	6.5	6.5	0	5.9	标准 SMA 级配
级配 5	⑤体积全替代矿粉-无纤维	12.0	0	0	5.9	非标准 SMA 级配
级配 6	⑥体积半替代矿粉-全纤维	3.4	8.6	0.30	5.9	非标准 SMA 级配

其中:

①对比样:标准 SMA 级配,絮状木质素纤维 0.3%,沥青用量 5.9%,不添加聚氨酯脲;

②半替代-半纤维:标准 SMA 级配,絮状木质素纤维减半至 0.15%,沥青用量 5.9%,聚氨酯脲替代一半的填料 6.5%;

③过筛全替代-无纤维:标准 SMA 级配,不使用纤维,沥青用量 5.9%,聚氨酯脲(过筛后<0.075 mm)替代全部填料;

④半替代-无纤维:标准 SMA 级配,不使用纤维,沥青用量 5.9%,聚氨酯脲替代一半的填料 6.5%;

⑤体积全替代-无纤维:非标准 SMA 级配(降低 0.075 mm 通过质量百分率),不使用纤维,沥青用量 5.9%,聚氨酯脲替代全部填料(体积)12%;

⑥体积半替代-全纤维:非标准 SMA 级配(降低 0.075 mm 通过质量百分率),絮状木质素纤维 0.3%,沥青用量 5.9%,聚氨酯脲替代一半的填料(体积)3.4%。

由于聚氨酯脲粉末的堆积密度远小于矿粉的

表 2 科思创聚氨酯脲的性能指标

测试指标	技术指标
分解温度/°C	≥400
堆积密度/(kg·m ⁻³)	750~950
表观相对密度	1.1~1.4

表 3 聚氨酯脲粉末的筛分结果

公称粒径/ mm	通过各筛孔(mm)的质量百分率/%			
	0.6	0.3	0.15	0.075
0~0.3	100	98.24	74.01	41.43

的聚氨酯脲掺入方案,采用马歇尔稳定度、冻融劈裂试验、动稳定度试验对掺加聚氨酯脲的 SMA 沥青混合料的空隙率、高低温性能进行表征。

3 配合比设计

3.1 聚氨酯脲的掺入试验设计

为研究聚氨酯脲掺入后对原沥青混合料的性能影响规律,选用 SMA-13 沥青混合料级配,研究聚氨酯脲替代矿粉和纤维后的沥青混合料性能变化情况,采用如表 4 所列的替代设计方案。

堆积密度,如果按照质量替代矿粉,聚氨酯脲的体积掺量较大,不利于配合比设计。因此,级配方案①~④试样是按质量替代法进行配合比设计,以满足现有的级配设计方法,级配方案⑤和⑥是采用体积替代法进行配合比设计,以满足实际试验的需求。

3.2 聚氨酯脲掺入的 SMA-13 沥青混合料配合比设计

按规范^[15]进行配合比设计,通过配合比设计,最终级配如表 5 所列,相应的合成级配图如图 1 所示。

3.3 聚氨酯脲掺入的沥青混合料性能表征

对表 4 所列的 6 个沥青混合料级配进行制样,并测试各个级配对应沥青混合料的马歇尔稳定度、冻融劈裂强度比(TSR)、动稳定度(DS)指标。测试结果见表 6。

4 结果与讨论

4.1 聚氨酯脲替代矿粉和纤维后的沥青混合料表观状分析

观察上述 6 个级配下的沥青混合料表观状,级配

表5 聚氨酯脲替代矿粉和纤维的试验设计方案

序号	筛孔 替代方案	通过筛孔(mm)的质量百分率/%								
		13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配1	①对比样	96.5	71.2	29.5	21.9	17.2	14.7	12.8	11.6	10.9
级配2	②半替代矿粉-半纤维	96.4	70.2	27.6	20.8	17.4	15.9	14.6	12.3	9.7
级配3	③全替代矿粉-无纤维	96.6	71.8	30.5	22.8	17.7	15.1	13.0	11.7	11.0
级配4	④半替代矿粉-无纤维	96.4	70.2	27.6	20.8	17.4	15.9	14.6	12.3	9.7
级配5	⑤体积全替代矿粉-无纤维	96.6	71.8	30.5	23.1	18.6	16.4	14.3	10.4	5.9
级配6	⑥体积半替代矿粉-全纤维	96.3	69.2	25.2	18.1	14.6	13.1	11.8	10.2	8.7

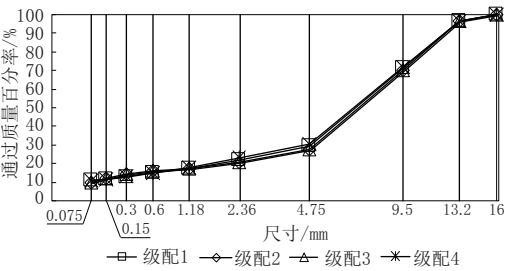
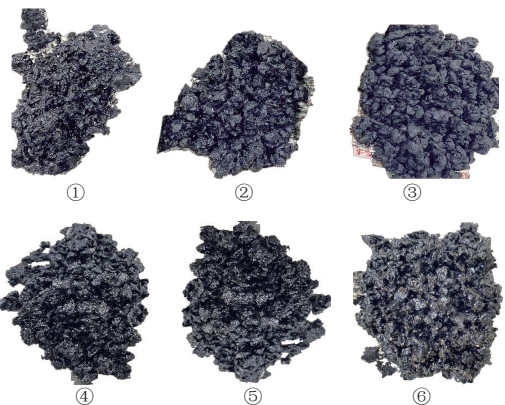


图1 替代方案1~4级配曲线对比

表6 聚氨酯脲掺入的沥青混合料性能测试结果

级配	VV/%	稳定度/kN	流值/0.1mm	TSR/%	DS/(次·mm)
1	3.40	11.85	59.2	99.28	6 707
2	1.20	10.03	51.7	90.77	3 708
3	0.60	10.36	45.4	91.10	3 035
4	1.25	9.39	41.7	92.85	6 411
5	1.54	4.21	53.9	65.20	1 389
6	4.76	6.88	31.3	88.89	6 449
要求值	3~4	≥6.0	—	≥80	≥3 000

1为正常的SMA-13沥青混合料级配,游离沥青稍多,构造明显,符合SMA级配沥青混合料的沥青表观状。其余级配方案制备的沥青混合料表观状与级配1表观状对比如图2所示。



1—级配1的沥青混合料表观图;2—级配2的沥青混合料表观图;3—级配3的沥青混合料表观图;4—级配4的沥青混合料表观图;5—为级配5的沥青混合料表观图;6—级配6的沥青混合料表观图。

图2 级配1~6制备的沥青混合料表观状对比

级配2的沥青混合料呈现整体干涩、无游离沥青状态,碾压后表面出现沥青浆,无构造;级配3的沥青混合料呈现整体干涩、颗粒散落状、无游离沥青状

态,碾压后表面出现大量沥青浆,无构造;级配4的沥青混合料呈现多余沥青浆,碾压后构造较小;级配5的沥青混合料呈现大块散落颗粒,无游离沥青,碾压后表面出现多余沥青浆,无构造;级配6的沥青混合料的表观状与级配1相当。

上述结果表明:聚氨酯脲的加入,无论是替代矿粉或者纤维,都会对原沥青混合料的表观状造成一定影响,且替代的比例越高,对原沥青混合料的表观状特别是表观构造和沥青胶浆状态影响越大。故应结合相应的沥青混合料性能指标评估聚氨酯脲掺入后对原级配的影响。

4.2 聚氨酯脲替代矿粉的适用性研究

为分析聚氨酯脲替代矿粉的加入,对沥青混合料性能指标的影响规律,结合上表6,对级配3、级配4和级配5的沥青混合料指标进行分析。级配3、级配4、级配5三个方案都是无纤维掺入方案,通过三者的沥青混合料性能对比,可以分析聚氨酯脲替代矿粉对沥青混合料的性能影响,其中级配3和级配4是质量替代法,级配5是体积替代法,由于聚氨酯脲相比矿粉具有更低的比重,因此在同体积下,聚氨酯脲的质量更小。

当无纤维掺入时,与级配4的聚氨酯脲替代一半质量矿粉相比,采用级配3的质量全替代,其对应的沥青混合料指标有所降低,沥青混合料低温性能指标 TSR 由 92.85% 降为 91.1%,动稳定度指标 DS 从 6 411 次/mm 降为 3 035 次/mm,表明聚氨酯脲完全替代矿粉时,沥青混合料的高温性能会大幅下降;而级配5聚氨酯脲采用全体积替代矿粉,由于聚氨酯脲比矿粉比重轻,在体积替代法下,级配5比级配4加入更少质量的聚氨酯脲,测得级配5的稳定度指标、DS 指标、TSR 指标,相比级配4的混合料指标,都有大幅度的下降,其中马歇尔稳定度指标下降 55.2%, TSR 指标下降 29.8%, DS 指标下降 78.3%,且 DS 指标已不满足规范要求,表明单单采用聚氨酯脲时,沥青混合料的高低温性能较差,结合上述分析显示,聚氨

酯脲替代矿粉时,可能会造成不良影响,应注意掺入比例,且不能完全替代矿粉在沥青混合料中的作用。

4.3 聚氨酯脲替代纤维的适用性研究

为分析聚氨酯脲替代纤维的加入,对沥青混合料性能指标的影响规律,结合表6,对级配2、级配4和级配6的沥青混合料指标进行分析。级配2、级配4和级配6都是矿粉部分被聚氨酯脲替代,且纤维掺量分别为半纤维、无纤维和全纤维,通过三种沥青混合料的对比,分析在矿粉被部分替代条件下,不同纤维掺量对应的沥青混合料性能差别,以此来判定聚氨酯脲对纤维的替代效果。

与级配4的无纤维相比,级配2加入一半质量的纤维,二者的沥青混合料DS指标分别为:3 708 mm/次和6 401 mm/次,级配2沥青混合料高温性能指标下降严重,分析原因为:聚氨酯脲的高吸油性特点,类似纤维的吸油性,聚氨酯脲替代矿粉加入后,充当了部分纤维的作用,当沥青混合料级配中纤维掺量过高时,结合前面4.1节中级配2的沥青混合料偏干涩表观状,沥青胶浆无法对石料形成有效裹覆效果,致使沥青混合料的高温稳定性指标受损。

与级配4相比,级配6加入全部质量的纤维,但由于级配6中聚氨酯脲采用了体积法替代一半矿粉,相比级配2的质量替代法,级配6中聚氨酯脲的加入量较少,虽然此时纤维掺量为全掺入,但此时沥青混合料表观状与对比样级配1相近,且级配6的各项性能指标与对比样级配1相近,表明聚氨酯脲加入沥青混合料中,替代矿粉和纤维发挥作用时,应结合表观状和高低温性能等方面综合评价其掺入效果。

结合表4中的聚氨酯脲掺量和表6中的DS指标,通过回归分析,确定聚氨酯脲在SMA-13中的掺量区间。

回归公式为:

$$y=-193.3x+921.8, R^2=0.9205$$

式中: y 为DS指标数据; x 为聚氨酯脲掺比数据;按规范要求SMA沥青混合料DS $\geq 3\,000$ 次/mm为前提,计算可知聚氨酯脲在SMA-13沥青混合料中的掺比范围为:0%~6.3%。

5 结 语

(1)聚氨酯脲在SMA-13沥青混合料中具有一定的替代矿粉和纤维的潜力,但其掺入比例对混合料性能有显著影响。完全替代矿粉会导致沥青混合料的高温性能大幅下降,因此不能完全替代矿粉。

(2)聚氨酯脲的高吸油性使其在替代矿粉时,能够部分发挥纤维的作用,当掺入聚氨酯脲时,纤维掺量过高会影响沥青混合料中沥青胶浆对石料的裹覆效果,导致沥青混合料的高温稳定性下降。

(3)聚氨酯脲的掺入应结合沥青混合料的表观状态和高低温性能指标进行综合评估,确保其在替代矿粉和纤维时不会对混合料的整体性能产生负面影响。推荐聚氨酯脲在SMA-13沥青混合料中的最佳掺比为0%~6.3%。

参考文献:

- [1] 刘雯月,郑传峰,毕海鹏,等.聚氨酯改性沥青制备工艺及混合料性能评价[J].公路工程,2024,49(5):154-158.
- [2] 赵宏天,姜添强,李凯,等.高温聚氨酯及其混合料路用性能研究[J].当代化工,2023,52(6):1297-1302.
- [3] 刘雯月.高性能聚氨酯改性沥青薄层罩面设计优化研究[D].长春:吉林大学,2023.
- [4] 房明,唐国奇,王涵,等.聚氨酯改性沥青制备及其混合料路用性能研究[J].聚氨酯工业,2022,37(6):18-21.
- [5] 杨嘉,叶维,董越.聚氨酯对沥青混合料路用性能的改善效果研究[J].四川水泥,2022(8):227-229.
- [6] 项柳福,朱慧芳,林汉忠,等.聚氨酯改性沥青混合料配比设计及其路用性能[J].公路,2021,66(10):352-356.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王渤.聚氨酯改性环氧树脂道路修补材料的性能研究[D].乌鲁木齐:新疆大学,2018.
- [10] 王渤,温勇,刘旭东,等.聚氨酯不同组成对道路修补材料性能影响研究[J].热固性树脂,2018,33(6):43-46.
- [11] 魏健.热塑性聚氨酯弹性体(TPU)的合成及性能研究[D].青岛:青岛科技大学,2020.
- [12] 王雪.路用聚氨酯固化/老化规律及界面稳定性研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [13] 吴池.聚氨酯多孔弹性混合料配合比设计及降噪特性研究[D].西安:长安大学,2022.
- [14] 李添帅.异氰酸酯基聚氨酯前驱体改性沥青的改性机理及性能研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学,2022.
- [15] JTG/T 3350-03—2020,排水沥青路面设计与施工技术规范[S].