

低温沥青混合料USPM-13C在市政道路中的应用

王 阳, 程小亮, 韩雷雷

中冶南方城市建设工程技术有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年1月29日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年3月31日

摘 要

本文在沥青混合料配合比设计的基础上, 通过高温稳定性试验、低温抗裂性试验和水稳定性试验, 对比研究了低温沥青混合料USPM-13C和SBS改性沥青混合料AC-13C的路用性能。结果表明, 低温沥青混合料USPM-13C的动稳定度值是SBS改性沥青混合料AC-13C的96.4%, 而低温弯曲破坏应变增加6%, 残留稳定度及残留强度比增加2%以上。本文结合市政道路工程实践介绍了低温沥青混合料USPM-13C的应用情况, 可为今后其他项目设计和施工提供一些参考。

关键词

USPM-13C, 低温沥青混合料, 路用性能, 工程应用

Application of USPM-13C Low-Temperature Modified Asphalt Mixture in Municipal Road

Yang Wang, Xiaoliang Cheng, Leilei Han

WISDRI City Construction Engineering & Research Incorporation Ltd., Wuhan Hubei

Received: Jan. 29th, 2024; accepted: Mar. 22nd, 2024; published: Mar. 31st, 2024

Abstract

In this paper, on the basis of the mix proportion design of asphalt mixture, the pavement performance of low-temperature modified asphalt mixture USPM-13C and SBS modified asphalt mixture AC-13C is compared and studied through high-temperature stability test, low-temperature crack resistance test and water stability test. The results show that the dynamic stability value of low-temperature modified asphalt mixture USPM-13C is 96.4% of that of SBS modified asphalt mixture AC-13C, while the low-temperature bending failure strain increases by 6%, the residual stability and residual strength

ratio increase by more than 2%. Combined with municipal road engineering practice, the application of low-temperature modified asphalt mixture USPM-13C is introduced, which can provide some references for the design and construction of other projects in the future.

Keywords

USPM-13C, Low-Temperature Modified Asphalt Mixture, Pavement Performance, Engineering Application

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

热拌沥青混合料为了保证压实效果,通常要求不得在气温低于 10℃ 的情况下施工[1]。低温环境沥青路面施工采用温拌沥青是一种较好的选择。李波等[2]研究发现,温拌沥青混合料的最低施工温度可以降至 0℃,王朝辉等[3]综述了常见温拌剂对沥青混合料和 SBS 改性沥青混合料低温性能产生不利影响,梁波等[4]综述了温拌沥青混合料的吸湿性降低了其水稳定性能。综上,温拌沥青在 0℃ 以下低温环境的应用仍有一定限制。

低温沥青(USP)是由道路石油沥青或改性沥青与一定比例低温沥青添加剂(USPA)混合而成。由低温沥青(USP)作为结合料形成的低温沥青混合料(USPM)可低温拌和,施工环境温度可低至-10℃,不仅改变了沥青混合料热拌热铺的施工工艺和受温度限制的情况,而且极大地减少了沥青混合料生产摊铺高温耗能,降低了沥青烟等有害气体的排放量,同时其低温性能和水稳定性不受影响,在低温环境沥青路面施工中具有很好的应用前景[1]。

本文结合室内试验[5] [6],对低温沥青混合料 USPM-13C 和 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 的高温稳定性试验、低温抗裂性试验和水稳定性试验进行了对比验证,对市政道路工程择优采用的低温沥青混合料 USPM-13C 施工工艺进行了研究,为低温沥青混合料的推广应用提供参考。

2. 低温沥青混合料配合比设计

2.1. 原材料

试验中所采用的原材料包括低温沥青(USP-1)、粗集料、细集料、矿粉。

2.1.1. 沥青

低温沥青(USP-1)由 A 级 70 号石油沥青和占沥青质量 4.5% 的低温沥青添加剂(USPA)组成。所用低温沥青(USP-1)性能指标见表 1。

Table 1. Performance index of low-temperature asphalt (USP-1)

表 1. 低温沥青(USP-1)性能指标

试验项目	技术要求	试验结果
针入度(25℃, 100 g, 5 s)/0.1 mm	35~85	40
延度(15℃, 5 cm/min)/cm	不小于 100	>100
软化点 T _{R&B} /℃	不小于 40	42
TFOT 后残留针入度比/%	实测记录	1.017

2.1.2. 粗集料

1#料、2#料、3#料的粒径分别为 10~15 mm、5~10 mm、3~5 mm 等 3 种规格粗集料，相关试验项目及试验结果见表 2。

Table 2. Technical performance of coarse aggregates

表 2. 粗集料技术性质

试验项目	技术要求	试验结果
表观相对密度	≤ 2.6	1#料 2.782, 2#料 2.748, 3#料 2.749
压碎值/%	≥ 26	16
洛杉矶磨耗损失/%	≥ 28	18.6
吸水率/%	≥ 2.0	0.8
坚固性/%	≥ 12	2.8
针片状含量	≥ 15	1#料 9.6, 2#料 10.8, 3#料 12.4

2.1.3. 细集料

0~3 mm 机制砂的试验项目及试验结果见表 3。

Table 3. Technical performance test results of fine aggregates

表 3. 细集料技术性能试验结果

试验项目	技术要求	试验结果
表观相对密度	≤ 2.5	2.759
含泥量/%	≥ 3	1.5
砂当量/%	≤ 60	70

2.1.4. 矿粉

矿粉性能试验结果见表 4，粒度范围见表 5。

Table 4. Technical performance test results of mineral powder

表 4. 矿粉技术性能试验结果

试验项目	技术要求	试验结果
表观密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	≤ 2.5	2.713
含水量/%	≥ 1	0.2
亲水系数	< 1	0.86

2.2. 混合料矿料级配

在工程设计级配范围内选择三种不同的矿料级配验证 2.36 mm 关键筛孔通过率对低温沥青混合料 USPM-13C 马歇尔试验指标的影响。低温沥青混合料 USPM-13C 矿料筛分、级配设计及矿料合成级配见表 5，这三组级配在 2.36 mm 关键筛孔上的通过率分别为粗级配 28.6%、中级配 32.5%、细级配 36.3%。

USPM-13C 混合料配合比设计按照马歇尔试验配合比设计方法来确定，根据不同油石比下混合料马歇尔试验结果，确定出最佳油石比为 4.5%。对选用的三组级配分别按油石比 4.5% 成型马歇尔试件，并进行马歇尔试验，试验结果见表 6。

Table 5. USPM-13C mineral material sieving, grading design and mineral material synthesis grading
表 5. USPM-13C 矿料筛分、级配设计及矿料合成级配

筛孔尺寸(mm)	矿料规格(mm)种类					粗级配 通过率	中级配 通过率	细级配 通过率	矿料级配范围 (%)
	10~15 (mm)	5~10 (mm)	3~5 (mm)	0~3 (mm)	矿粉				
各规格种类矿料通过百分率(%)									
16	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100	100	100.0	100
13.2	92.1	100.0	100.0	100.0	100.0	97.1	97.1	97.1	90~100
9.5	37.3	97.6	100.0	100.0	100.0	76.9	77.0	77.2	68~85
4.75	0.5	8.3	78.6	100.0	100.0	43.4	48.0	52.6	38~68
2.36	0.2	0.5	1.3	77.5	100.0	28.6	32.5	36.3	24~50
1.18	0.2	0.5	0.6	61.9	100.0	23.3	26.3	29.4	15~38
0.6	0.2	0.5	0.2	40.4	100.0	15.9	17.9	19.9	10~28
0.3	0.2	0.5	0.2	28.9	99.5	12.0	13.4	14.8	7~20
0.15	0.2	0.5	0.2	17.6	98.0	8.1	9.0	9.8	5~15
0.075	0.2	0.5	0.2	11.3	88.1	5.8	6.3	6.9	4~8
粗级配用量(%)	36	21	7	34	2	/	/	/	/
中级配用量(%)	36	16	7	39	2	油石比 4.5%			
细级配用量(%)	36	11	7	44	2	/	/	/	/

Table 6. Marshall test results for three preliminary grades

表 6. 三种初试级配的马歇尔试验结果

试验项目	粗级配	中级配	细级配	技术要求
试件毛体积相对密度	2.395	2.423	2.432	/
最大理论相对密度	2.538	2.536	2.534	/
空隙率(%)	5.6	4.5	4.0	4~6
矿料混合料的合成毛体积相对密度	2.661	2.657	2.653	/
矿料间隙率(%)	15.4	14.7	13.8	≥14.0
沥青饱和度(%)	59.5	65.1	67.1	65~75
稳定度(kN)	12.20	12.84	11.80	≥8.0
流值(0.1 mm)	29	34	38	15~40

由表 6 可知：在三个级配中，粗级配的饱和度偏小，细级配的空隙率偏小，中级配的稳定度较大且各项技术指标均良好，同时中级配在 2.36 mm 筛孔上的通过率位于级配范围的中值附近，便于施工控制，综合分析选择中级配作为设计级配。

2.3. 混合料配合比设计

低温沥青(USP-1)的连粘性能增强，沥青的分散性能更好，与热拌沥青相比，可减少沥青用量 10% 左右。采用相同的粗细集料及矿粉，SBS 改性沥青混合料 AC-13C 按照马歇尔试验配合比设计方法确定出最佳油石比为 5.0%。表 7 是两种改性沥青混合料在各自最佳油石比下的体积指标。

Table 7. Marshall test results

表 7. 马歇尔试验结果

混合料类型	最佳油 石比/%	稳定度 /kN	流值 /0.1 mm	空隙 率/%	矿料间隙 率/%	沥青饱和 度/%	毛体积相 对密度	理论最大相 对密度
SBS 改性 AC-13C	5.0	10.85	30.2	4.5	16.2	72.2	2.402	2.515
USPM-13C	4.5	12.84	34	4.5	14.7	65.1	2.423	2.536
规范要求	/	≥8.0	15~40	4~6	≥14.0	65~75	/	/

3. 低温沥青混合料路用性能验证

沥青路面的破坏模式有很多种, 预防车辙、开裂、水损害等破坏主要通过对混合料的配合比试件检验进行源头控制。按最佳油石比条件下, 分别进行车辙试验、低温弯曲试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验, 对低温沥青混合料 USPM-13C 及 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 的路用性能进行检验。

3.1. 高温稳定性试验

高温稳定性是指沥青混合料在高温和车辆荷载共同作用下抵抗永久变形的能力, 无机结合料稳定类基层沥青路面车辙主要由沥青混合料层永久变形产生, 对设定的原材料, 混合料抗永久变形能力主要受级配组成、沥青用量和压实度等因素影响, 规范采用车辙试验的动稳定度作为高温稳定性性能检验指标。

表 8 为两种改性沥青混合料的车辙试验结果。

Table 8. Rutting test results

表 8. 车辙试验结果

混合料类型	动稳定度/(次/mm)
SBS 改性 AC-13C	4206
USPM-13C	4056
技术要求	≥2800

3.2. 低温抗裂性试验

低温开裂是我国寒冷地区冬季路面常见的病害, 以横向裂缝的表现形式为主, 气温骤降使温度应力超过沥青混合料的抗拉强度或温度循环使沥青混合料极限拉应变减小均能造成沥青混合料低温开裂。规范采用低温弯曲试验的破坏应变作为低温抗裂性能检验指标。低温弯曲试验结果见表 9。

Table 9. Results of low-temperature bending test

表 9. 低温弯曲试验结果

混合料类型	抗弯拉强度/MPa	破坏应变/ $\mu\epsilon$	劲度模量/MPa	技术要求/ $\mu\epsilon$
SBS 改性 AC-13C	8.56	2814	3042	≥2500
USPM-13C	8.40	2983	2816	

3.3. 水稳定性试验

水损害是指车辆荷载作用下, 渗入路面孔隙的水产生的动水压力或者循环真空负压抽吸, 使得水分逐渐渗入到沥青与集料的接触面上, 集料和沥青的黏附性降低, 沥青混合料松散, 沥青路面形成坑槽的损坏现象。由于水稳定性不足引起的水损害, 是目前沥青路面早期病害的主要形式之一。在饱水情况下沥青混合料强度降低越少也反映其水稳定性越好。表 10 和表 11 分别为最佳油石比下两种改性沥青混合料浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验结果。

Table 10. Submerged Marshall test results

表 10. 浸水马歇尔试验结果

混合料类型	马歇尔稳定度/kN	浸水马歇尔稳定度/kN	残留稳定度/%	要求/%
SBS 改性 AC-13C	10.85	9.73	89.7	≥85
USPM-13C	12.84	11.76	91.6	

Table 11. Freeze-thaw splitting test results
表 11. 冻融劈裂试验结果

混合料类型	未冻融劈裂强度/MPa	冻融劈裂强度/MPa	残留强度比/%	要求/%
SBS 改性 AC-13C	1.05	0.90	85.7	≥80
USPM-13C	1.259	1.102	87.5	

3.4. 试验结果分析

1) 两种改性沥青混合料的动稳定度均远超过规范“动稳定度不小于 2800 次/mm”的要求。低温沥青混合料 USPM-13C 的动稳定度值为 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 的 96.4%，两者相差较小，说明低温沥青混合料 USPM-13C 也具有优良的高温抗车辙性能。

2) 低温沥青混合料 USPM-13C 比 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 的低温弯曲破坏应变增加 6%，说明低温沥青混合料 USPM-13C 具有优良的低温抗裂性能。

3) 从浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验来看，两种改性沥青混合料都满足规范要求，具有较好的水稳定性，低温沥青混合料 USPM-13C 的残留稳定度及残留强度比均优于 SBS 改性沥青混合料 AC-13C，增幅均在 2% 以上。

4) 低温沥青添加剂(USPA)以橡胶、树脂类及表面活性剂等为原材料，经特定工艺合成，与基质沥青混合后，能显著降低沥青黏度和混合料的拌和、摊铺、碾压温度。在使用过程中，低温沥青混合料 USPM 经车轮碾压、阳光等外因增加沥青分子量及黏度，同时 USP 沥青中的活性组份与集料中的硅酸盐等物质发生化学改性反应，使得 USPM 强度随着复合改性进程而逐渐增强，混合料的抗低温冻裂性能及粘附性能得到提高。

4. 低温沥青混合料工程应用

工程路段位于开封市，为城市主干路提升改造项目，根据施工进度计划，该工程需在 2022 年 1 月底完成沥青表面层的摊铺。开封市 1 月日均最低温度 -4℃，日均最高温度 5℃。经技术经济对比分析，本工程采用低温沥青混合料 USPM-13C 进行整体罩面补强。

4.1. 低温沥青(USP-1)的制备

低温沥青(USP-1)在沥青拌和站制备，基质沥青为 70 号石油沥青，低温沥青添加剂(USPA)掺量为基质沥青质量的 4.5%。低温沥青添加剂采用机械泵送方式添加，制备温度为 110~120℃，最高加热温度不超过 130℃，搅拌时间不少于 90 min。低温沥青制备时，基质沥青不超过制备罐容积的 2/3。

4.2. 低温沥青混合料 USPM-13C 的拌和及运输

低温沥青混合料 USPM-13C 采用间歇式拌和机拌和，每盘拌和时间不少于 45 s，其中干拌时间不少于 5 s [7]。混合料拌和时低温沥青加热温度 115~125℃，集料加热温度 130~140℃，考虑该工程拌和站与施工现场的运输距离为 30 km，环境温度 -3~4℃，混合料出料温度控制在 125℃左右，运输到现场温度不低于 100℃，并随拌随铺，储存时间不超过 24 h。

4.3. 低温沥青混合料 USPM-13C 的摊铺及碾压

半幅 16 m 路面由两台履带式摊铺机成梯队作业摊铺，前后错开 10~15 m，摊铺范围重叠 10 cm，使纵向成为热接缝。摊铺机缓慢、匀速、连续不间断摊铺，不随意变换速度或中途停顿，摊铺的速度控制在 1~3 m/min，摊铺温度不低于 95℃。施工过程中设置合理的碾压段落长度 [8]，初始碾压温度不低于 80℃，

初压采用双钢轮振动压路机静压 1~2 遍, 碾压速度 1~1.5 km/h。复压采用双钢轮振动压路机振动压实 2~3 遍, 碾压速度 1.5~3 km/h, 振动碾压时采用高频率低振幅, 折返时先停止振动。终压采用钢筒式压路机, 静压不少于 2 遍, 直至无明显轮迹为止, 碾压速度 1.5~3 km/h, 碾压终了的表面温度不低于 60℃。摊铺层自然冷却至 50℃以下 24 h 后开放交通。

4.4. 质量检测及跟踪调查

2022 年 1 月底工程完工后, 按规定频率对路面各项指标[9]进行了检测, 钻芯取样测得压实度均在 96% 以上, 通过现场渗水试验测得渗水系数为 135 ml/min, 铺砂法测得构造深度为 0.65 mm, 各项指标均满足相关规范要求。工程路段经过两年的通车运行未出现明显车辙、严重横向裂缝及坑槽等病害, 激光路面综合检测车测得平整度 IRI 为 1.86 m/km, 横向力系数测定车测得横向力系数 SFC 为 60, 沥青路面平整度、抗滑能力等性能指标均保持较好状态。

5. 结语

1) USPM-13C 混合料配合比设计最佳油石比为 4.5%, 低于 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 的最佳油石比 5%, 通过试验验证矿料级配中 2.36 mm 关键筛孔通过率对混合料马歇尔试验体积指标的影响, 中级配的稳定性指标最优。

2) 经室内试验路用性能对比论证, 低温沥青混合料 USPM-13C 在高温性能方面与 SBS 改性沥青混合料 AC-13C 基本相当, 在低温抗裂性、水稳定性方面各项指标均有不同程度提高。

3) USPM-13C 混合料施工过程中沥青和集料加热温度、混合料出厂温度、摊铺温度、初压混合料内部温度等相较于 SBS 改性沥青混合料均降低 40℃以上。工程路段跟踪调查结果表明了低温沥青混合料 USPM-13C 的良好工程适用性。

参考文献

- [1] JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 李波, 任文宏, 周书友, 等. 低温条件下温拌沥青混合料施工温度范围[J]. 郑州大学学报, 2011, 32(6): 32-36.
- [3] 王朝辉, 陈姣, 侯明业. 道路常用温拌改性剂现状与路用性能评价[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 102-108.
- [4] 梁波, 张海涛, 梁缘. 温拌沥青技术研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(2): 24-46.
- [5] JTG E20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [6] 周水文, 谭忆秋, 孟良, 等. 低温沥青混合料抗冻性能试验研究[J]. 公路工程, 2017, 42(4): 21-24.
- [7] T/CECS G:D54-01-2019 道路低温沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
- [8] 李林. 低温沥青混凝土施工技术[J]. 公路, 2012, 2012(12): 68-71.
- [9] JTG F80/1-2017 公路工程质量检验评定标准[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.