

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.019

高抗车辙沥青路面技术在高速公路互通  
匝道路面维修中的应用

杨捷<sup>1</sup>, 孙建武<sup>2</sup>

(1.江苏京沪高速公路有限公司, 江苏 南京 210009;  
2.国路高科(北京)工程技术研究院有限公司, 北京 100089)

**摘要:** 针对高速公路匝道车辙治理,通过室内试验对 SBS 改性沥青、抗车辙剂、无车辙沥青路面 3 种技术方案的路用性能进行对比研究,结果显示,无车辙沥青路面技术具有突出的高温性能,同时水稳定性、低温抗裂性能也比其他技术显著提高;结合试验段及实体工程对无车辙沥青路面技术进行应用研究,探讨其施工工艺和质量控制措施,提出适宜的施工控制参数。

**关键词:** 公路;匝道;抗车辙沥青路面;路面维修

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)01-0095-06

随着交通量的加大和渠化的加剧,沥青路面车辙病害呈现加重的趋势<sup>[1]</sup>。与普通路面相比,互通匝道的受力状态更复杂。在匝道纵坡工况下,车辆上坡时驱动轮出现超重、从动轮出现失重现象,容易产生“布载不均匀”的现象,导致局部位置所承受的荷载远超设计值,极易出现车辙病害。纵坡增加和弯道半径减小还会增加铺装层的剪应变,在低速状态下沥青路面流动变形趋势加剧。如何采取有效的手段治理日益严重的车辙病害是匝道路面铺装需解决的关键问题之一<sup>[2-3]</sup>。可采用高性能 SBS 改性沥青、抗车辙剂等治理车辙病害,但它们无法满足以匝道为代表的特殊路段苛刻工况要求,在短时间内就出现严重的车辙现象,导致路面反复维修<sup>[4-7]</sup>。随着材料技术的进步,以 SBS 和环氧树脂复合的无车辙沥青路面技术应运而生,该技术通过 SBS 改性提高沥青路面的基础路用性能,通过环氧树脂固化形成的三维网络结构限制沥青混合料在高温重载条件下的流动变形趋势,抗车辙能力大幅提高。本文对常见的高抗车辙沥青路面技术进行性能对比研究,优选得到最佳方案,并结合 G40 沪陕(上海—西安)高速公路六合东枢纽互通匝道维修工程进行应用研究。

1 室内试验

为验证不同抗车辙技术的路用性能,优选最优方案,分别在室内对比高性能 SBS 改性沥青、抗车

辙剂、无车辙沥青路面技术的高温稳定性、低温抗裂性能和抗水损害能力。

1.1 原材料

基质沥青采用 70# 重交沥青,其性能指标见表 1。无车辙沥青路面改性剂(NRP)由国路高科(北京)工程技术研究院有限公司提供,其性能指标见表 2。

表 1 70# 重交沥青的性能指标

检测项目	实测值	技术要求
针入度(25 ℃, 5 s, 100 g)/(0.1 mm)	72	60~80
0 针入度指数	0.4	-1.5~1.0
软化点(R&B)/℃	46.4	≥45
60 ℃动力黏度/(Pa·s)	213	≥160
10 ℃延度/cm	25.3	≥15
15 ℃延度/cm	>150	≥100
闪点/℃	304	≥260
质量变化/%	0.13	≤±0.8
RTFOT 残留针入度比(25 ℃)/%	78.3	≥61
后残留物 残留延度(10 ℃)/cm	8.5	≥6
残留延度(15 ℃)/cm	21.3	≥15

表 2 无车辙沥青路面改性剂的性能指标

检测项目	实测值	技术要求
外观	粉末状、均匀	粉末状、均匀
单粒颗粒质量/g	0.002	≤0.01
熔融指数/[g·(10 min) <sup>-1</sup> ]	13.7	≥2.0
灰分/%	1.52	≤3

SBS 改性沥青采用市售成品 SBS 改性沥青,其性能指标见表 3。抗车辙剂采用市售 F09,其技术指标见表 4。

表 3 SBS 改性沥青的性能指标

检测项目	实测值	技术要求
针入度(25℃,100 g,5 s)/(0.1 mm)	46.1	40~60
延度(5℃,5 cm/min)/cm	37.7	≥30
软化点(环球法)/℃	82	≥60
60℃动力黏度/(Pa·s)	976	≥800
溶解度(三氯乙烯)/%	99.6	≥99
闪点(COC)/℃	242	≥230
贮存稳定性离析(48 h 软化点差)/℃	1.5	≤2.5
弹性恢复(25℃)/%	79	≥75
质量损失/%	0.2	≤±1.0
RTFOT 延度(5℃,	17	≥15
后残留物 5 cm/min)/cm		
针入度比/%	68	≥65

表 4 F09 抗车辙剂的性能指标

检测项目	实测值	技术要求
外观	粉末状、均匀	颗粒状、饱满、均匀无结块
单粒颗粒质量/g	0.01	≤0.03
熔融指数/[g·(10 min) <sup>-1</sup> ]	2.15	≥1.0
灰分/%	1.6	≤5

粗集料、细集料均采用玄武岩,木质素纤维由江苏益贝交通发展有限公司提供,其性能指标均符合 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求<sup>[8]</sup>。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 沥青混合料成型

沥青混合料级配采用 SMA-13、SUP-13,各粒径通过率见表 5、表 6。

表 5 SMA-13 沥青混合料的级配

筛孔尺	通过率/%		筛孔尺	通过率/%	
寸/mm	上限	下限	寸/mm	上限	下限
13.200	97.5	89.5	0.600	18.8	12.8
9.500	70.5	62.5	0.300	16.1	10.1
4.750	32.5	24.5	0.150	14.6	8.6
2.360	25.5	19.5	0.075	11.6	7.6
1.180	22.8	16.8			

采用马歇尔法进行沥青混合料配合比设计,得到各档矿料配比和最佳油石比。根据工程经验确定

表 6 SUP-20 沥青混合料的级配

筛孔尺	通过率/%		筛孔尺	通过率/%	
寸/mm	上限	下限	寸/mm	上限	下限
19.000	100.0	93.5	1.180	21.4	13.4
13.200	76.5	66.5	0.600	15.7	7.7
9.500	59.8	49.8	0.300	10.3	2.3
4.750	42.4	32.4	0.150	9.1	1.1
2.360	29.3	21.3	0.075	6.3	2.3

抗车辙剂和无车辙沥青路面改性剂的最佳掺量。结果如下:SMA-13 的最佳油石比为 5.9%,SUP-20 的最佳油石比为 4.5%;抗车辙剂掺量为 0.4%,无车辙沥青路面改性剂掺量为 1%。

按照 JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》的要求制备、成型 SBS 改性沥青、抗车辙剂沥青混合料试件。无车辙沥青路面混合料试件的制备方法如下:1) 将无车辙沥青路面改性剂和热集料干拌 90 s,使无车辙沥青路面改性剂均匀分散在矿料中;2) 加入沥青,拌和 90 s;3) 加入矿粉,拌和 90 s;4) 将拌和好的混合料置于保温桶或搪瓷盘中,放入 170~180℃烘箱中恒温发育 2 h(模拟摊铺前运输车保温工况),取出后立即成型沥青混合料试件。

### 1.2.2 沥青混合料路用性能检测

根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》<sup>[9]</sup>,在 60℃、0.7 MPa 接地压强条件下采用胶轮对试件进行车辙试验,依据 45~60 min 变形量的差值计算动稳定度,以此表征沥青混合料的高温稳定性。以陕西汽车集团有限责任公司生产的重型卡车 SX1160 作为试验车辆,通过 Trucksim 软件模拟<sup>[10]</sup>,得到在匝道常见 40 km/h 限速下,转弯半径由 120 m 降至 40 m 时产生的竖向应力由 0.7 MPa 增加至 1.0 MPa。可见,在高速公路匝道特殊工况下,60℃、0.7 MPa 已无法满足实际需要。为此,采用 60℃、1.0 MPa 条件进行车辙试验,以动稳定度评价沥青混合料的高温抗永久变形能力。

低温抗裂性能通过低温弯曲试验评价,抗水损害能力通过马歇尔残留稳定性和冻融劈裂抗拉强度比评价。

### 1.3 试验结果分析

(1) 马歇尔试验结果分析。3 种沥青混合料马歇尔试验结果见表 7。由表 7 可知:2 种级配下,无车辙沥青混合料均具有较高的力学强度,较 SBS 改性沥青、抗车辙剂沥青混合料大幅提高。

(2) 高温稳定性评价。3 种沥青混合料车辙试

表 7 不同沥青混合料马歇尔试验结果

沥青混合料类型	空隙率/%		稳定度/kN		流值/mm	
	SMA-13	SUP-20	SMA-13	SUP-20	SMA-13	SUP-20
无车辙沥青混合料	3.5	4.4	13.5	13.7	3.10	2.25
SBS 改性沥青混合料	3.5	4.3	12.7	12.9	3.25	3.21
抗车辙剂沥青混合料	3.6	4.4	10.9	11.2	3.50	3.30

验结果见表 8。由表 8 可知:将接地压强提高后,不同类型沥青混合料之间的区分度得到加强,抗车辙能力方面,无车辙沥青混合料>抗车辙剂沥青混合料>SBS 改性沥青混合料,无车辙沥青混合料的动稳定度显著高于另外 2 种沥青混合料,无车辙沥青的高温稳定性改善显著,能较好地抵抗沥青路面的高温永久变形。

(3) 水稳定性评价。3 种沥青混合料的浸水马歇尔试验结果见表 9,劈裂试验结果见表 10。由表 9、表 10 可知:在水稳定性方面,无车辙沥青混合

料>SBS 改性沥青混合料>抗车辙剂沥青混合料,无车辙沥青混合料具有最优异的水稳定性,在有水的情况下依然能保持原性质而不发生变化。

表 8 不同沥青混合料车辙试验结果(60 ℃、1.0 MPa)

沥青混合料类型	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	
	SMA-13	SUP-20
无车辙沥青混合料	18 569	25 200
SBS 改性沥青混合料	3 661	3 821
抗车辙剂沥青混合料	4 365	4 512

表 9 不同沥青混合料浸水马歇尔试验结果

沥青混合料类型	标准稳定度/kN		浸水稳定度/kN		浸水残留稳定度/%	
	SMA-13	SUP-20	SMA-13	SUP-20	SMA-13	SUP-20
无车辙沥青混合料	13.5	13.7	12.59	12.74	93.3	93.0
SBS 改性沥青混合料	12.7	12.9	11.44	11.56	90.1	89.6
抗车辙剂沥青混合料	10.9	11.2	9.44	9.59	86.6	85.6

表 10 不同沥青混合料劈裂试验结果

沥青混合料类型	劈裂强度/MPa		冻融劈裂强度/MPa		冻融劈裂强度比/%	
	SMA-13	SUP-20	SMA-13	SUP-20	SMA-13	SUP-20
无车辙沥青混合料	1.080 0	1.017 5	0.982 5	0.910 0	90.9	92.3
SBS 改性沥青混合料	1.150 0	1.120 0	1.010 0	0.992 0	87.5	88.6
抗车辙剂沥青混合料	1.090 0	0.890 0	0.885 0	0.717 0	81.2	80.6

(4) 低温抗裂性能评价。3 种沥青混合料的低温弯曲试验结果见表 11。由表 11 可知:在低温抗裂性能方面,无车辙沥青混合料最佳,SBS 改性沥青其次,加入抗车辙剂的沥青混合料较差。究其原因,可能是由于无车辙沥青混合料中加入了大比例的 SBS 聚合物改性剂,而抗车辙剂的成分主要为硬脆

的 PE(聚乙烯)材料,会在一定程度上对低温性能造成损害。

综上,无车辙沥青混合料的高温性能显著优于其他 2 种沥青混合料,在力学强度、水稳定性、低温性能方面也具有一定优势,其路用性能优良,可大幅提高高速公路互通匝道等苛刻工况下沥青路面的服役寿命。

表 11 不同沥青混合料低温弯曲试验结果

沥青混合料类型	极限破坏应变/ $\mu\epsilon$	
	SMA-13	SUP-20
无车辙沥青混合料	2 852.4	2 831.3
SBS 改性沥青混合料	2 725.1	2 623.3
抗车辙剂沥青混合料	2 232.1	2 135.3

2 实体工程应用

2.1 项目概况

六合东枢纽互通是 G40 沪陕高速公路与 G328 国道的交叉互通,为双喇叭形开放式互通,东侧为 G40 沪陕高速公路六合东主线收费站,西侧为瓜埠

互通。近年六合东枢纽互通车流量逐年增大,且方向分布十分明显,连接 G328 仪征方向和 G40 南京方向的出入口流量远高于另一方向,方向系数接近 0.9,货车比例接近 50%。路面病害类型主要为车辙、修补密集、横向裂缝、坑槽等(见图 1)。



图 1 六合东枢纽互通匝道维修前病害情况

在前期调研及分析评价的基础上,确定在京沪(北京—上海)高速公路六合东枢纽互通匝道维修工程中采用双层无车辙路面技术,中面层采用 6 cm SUP-20,上面层采用 4 cm SMA-13(见图 2),无车辙沥青路面改性剂掺量均为混合料质量的 1%。

2.2 试铺筑

该项目为无车辙沥青路面技术在高速公路匝道维修中的首次应用。为完善施工过程控制措施,给后续施工积累经验,先后实施 2 段试验段铺筑(见表 12和图 3)。

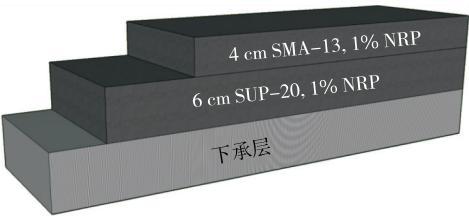


图 2 路面结构设计图

表 12 无车辙沥青路面试铺情况

试验段编号	桩号	方向、车道	虚铺厚度/cm
试验段 1	K346+032—132	扬宁、第三车道	4.8+7.2
试验段 2	K394+500—000	扬宁、第三车道	4.8+7.2

在试铺现场取料,进行沥青混合料抽提及马歇尔试验,并开展现场检测,结果见表 13~18。

2.3 实体工程应用

在前期室内验证、试验段铺筑的基础上,在六合东互通 G328 国道双向高速公路入口匝道、六合东互通 G40 沪陕高速公路双向出口匝道开展无车辙沥青路面施工。

2.3.1 沥青混合料生产

沥青混合料生产采用安迈 4000 间歇式沥青拌和楼,生产能力满足摊铺机摊铺要求。混合料拌和

表 13 SMA-13 混合料抽提结果

级配类型及 试验段编号	下列筛孔(mm)的通过率/%								
	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
上限	97.5	70.5	32.5	25.5	22.8	18.8	16.1	14.6	11.6
下限	89.5	62.5	24.5	19.5	16.8	12.8	10.1	8.6	7.6
试验段 1	91.4	66.4	26.6	22.4	17.8	14.2	12.3	11.4	10.2
试验段 2	89.9	62.9	26.6	21.8	17.1	12.9	12.3	11.5	10.7

表 14 SUP-20 混合料抽提结果

级配类型及 试验段编号	下列筛孔(mm)的通过率/%									
	19.000	13.200	9.500	4.750	2.360	1.180	0.600	0.300	0.150	0.075
上限	100.0	76.5	59.8	42.4	29.3	21.4	15.7	10.3	9.1	6.3
下限	93.5	66.5	49.8	32.4	21.3	13.4	7.7	2.3	1.1	2.3
试验段 1	93.7	67.1	51.8	33.6	25.1	16.4	10.2	6.5	5.3	4.4
试验段 2	94.2	68.2	51.2	35.8	24.9	17.6	11.7	8.2	6.1	4.9

表 15 SUP-20 马歇尔试验结果

试验段编号	毛体积相 对密度	理论最大密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)	饱和度/%	空隙率/%
试验段 1	2.438	2.539	15.3	33.6	69.3	4.3
试验段 2	2.450	2.539	14.7	27.8	73.5	3.5
技术要求	—	—	≥8.0	15~40	65~75	2~5



表 16 SMA-13 马歇尔试验结果

试验段编号	毛体积相对密度	理论最大密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	稳定度/ kN	流值/ (0.1 mm)	饱和度/%	空隙率/%	析漏/%
试验段 1	2.443	2.563	13.4	29.1	75.5	4.7	0.02
试验段 2	2.469	2.563	12.7	23.4	78.3	3.6	0.02
技术要求	—	—	$\geq 12.0$	15~40	75~85	2~5	$\leq 0.1$

表 17 SMA-13 上面层现场检测结果

桩号	压实度/%	渗水系数/ ( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	构造深度/ mm
K346+060	95.6	5	0.72
K346+100	96.7	10	0.98
K394+150	95.0	34	0.82
K394+250	94.9	43	0.78
技术要求	$\geq 94$	$\leq 50$	$\geq 0.55$

表 18 SUP-20 中面层现场检测结果

桩号	压实度/%	渗水系数/ ( $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ )	构造深度/ mm
K346+060	98.1	25	1.10
K346+100	97.2	8	0.72
K394+150	96.7	39	0.81
K394+250	97.4	25	0.85
技术要求	$\geq 93$	$\leq 50$	$\geq 0.55$

温度按表 19 控制,其他按 JTG F40—2017《公路沥青路面施工技术规范》执行。

表 19 无车辙沥青混合料的生产温度

项目	温度/ $^{\circ}\text{C}$
沥青加热温度	155~165
骨料加热温度	190~220
出料温度	185~195
混合料废弃温度	$\geq 205$ 或 $\leq 175$

无车辙沥青路面改性剂采用人工投放,生产完成后,通过数袋复核。

2.3.2 沥青混合料运输

沥青混合料运输采用 15 t 以上自卸车。装料前将车厢清扫干净,车厢底板与侧板抹油水混合液(1:3)以防混合料黏结车厢。为防止热量散失,装料后用双层油布加盖棉被并用绳绑牢。装料后及时测量混合料出厂温度,并对所有到场沥青混合料进行温度检测,温度控制在 195~205  $^{\circ}\text{C}$ 。

2.3.3 沥青混合料摊铺和碾压

沥青混合料的摊铺、碾压温度按表 20 控制。

表 20 沥青混合料施工温度控制参数

项目	温度/ $^{\circ}\text{C}$
摊铺温度	$\geq 175$
初压开始温度	$\geq 170$
终压开始温度	$\geq 130$
碾压终了表面温度	$\geq 110$
开放交通时路表温度	$\leq 50$

SUP-20 路面复压采用胶轮压路机,紧跟在初压后进行,且不得随意停顿,相邻碾压带重叠 1/3~1/2 碾压轮宽度,碾压至要求的压实度。SMA-13 路面复压采用钢轮压路机,采取振动方式,紧跟在初压后进行,且不得随意停顿,不得在前进时直接变线,不得在未碾压的路面上转向。钢轮压路机采用雾化喷水,防止压路机轮粘连热混合料。施工完成后,待温度降低至 50  $^{\circ}\text{C}$  即可开放交通。

2.3.4 沥青混合料取料及现场检测

施工过程中,现场取沥青混合料进行马歇尔检测,结果见表 21。

表 21 现场混合料检测结果

混合料类型	毛体积相对密度	空隙率/%	稳定度/kN
SMA-13	2.481	3.2	13.42
SUP-20	2.442	3.8	16.27

工程施工完成后,对路面进行性能检验和质量评价。经评定,路面平整、密实,集料颗粒分布均匀,无花白料、脱落、掉渣、裂缝、搓板等现象(见图 3)。



图 3 无车辙沥青路面检测

3 结论

(1) 室内验证结果显示,无车辙沥青混合料具

有突出的高温抗永久变形能力,其力学强度、水稳定性和低温抗裂性能也比 SBS 改性沥青、抗车辙剂沥青混合料有显著改善,较适合高速公路匝道等苛刻工况。

(2) 无车辙沥青路面施工工艺与常规沥青路面施工基本一致,不会增加操作难度,施工完成后可快速开放交通,具有良好的可行性和灵活性。

(3) 现场检测结果显示,无车辙沥青路面的各项性能均符合相关技术要求,具有一定推广应用价值。

#### 参考文献:

- [1] 邵楠.混凝土匝道桥沥青铺装层工作状态研究[D].大连:大连理工大学,2021.
- [2] 陈广秀,李志栋,黄晓明,等.水泥砼弯坡桥沥青铺装系统设计关键指标研究[J].大连交通大学学报,2017,38(2):88-93.
- [3] 李志栋,史贵军.混凝土弯坡桥沥青铺装系汽车荷载组成及平面布置研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(3):13-21+29.
- [4] 梅亮,余晖,吉增晖,等.干线公路沥青路面平交道口抗车辙剂应用性能试验研究[J].石油沥青,2021,35(6):57-62.
- [5] 王晨.基于重载交通下沥青混合料抗车辙性能研究[D].唐山:华北理工大学,2021.
- [6] 黄卫东,莫定成,吕泉,等.基于汉堡车辙试验的TB复合改性沥青混合料高温性能评价[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):12-21.
- [7] 陈其龙,覃峰,靳卫华,等.新型高强沥青SHRP试验及混合料抗水侵蚀性能研究[J].公路与汽运,2022(4):81-85+124.
- [8] 交通部公路科学研究所.公路沥青路面施工技术规范:JTG F 40—2004[S].北京:人民交通出版社,2004.
- [9] 交通运输部公路科学研究院.公路工程沥青及沥青混合料试验规程:JTG E20—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.
- [10] 张磊,伍石生,黄卫,等.面向桥面铺装动力响应分析的多尺度桥梁模型[J].中国公路学报,2012,25(3):87-93.
- 收稿日期:2022-03-02
- \*\*\*\*\*
- (上接第80页)
- [15] 唐凇,杨晓松,查旭东,等.基于含水率的重塑低液限黏土抗剪强度关系模型试验[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2021,18(2):26-32.
- [16] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [17] 吴礼舟,黄润秋.非饱和土渗流-变形耦合的数值分析[J].土木建筑与环境工程,2011,33(3):63-67.
- [18] 缪协兴,杨成永,陈至达.膨胀岩体中的湿度应力场理论[J].岩土力学,1993,14(4):49-55.
- [19] 路德春,杜修力,许成顺.有效应力原理解析[J].岩土工程学报,2013,35(S1):146-151.
- [20] 韦秉旭,周玉峰,刘义高,等.基于工程应用的膨胀土本构模型[J].中国公路学报,2007,20(2):18-22+50.
- 收稿日期:2022-09-03
- \*\*\*\*\*

## 《中外公路》2023 年征订通知

《中外公路》(原《国外公路》)创刊于1980年,双月刊,由长沙理工大学主管、主办,邮局公开发行至全国公路、市政、铁路、水利、建筑等系统和相关行业。属RCCSE中国核心学术期刊、首届中国高校特色科技期刊、中国高校技术类优秀期刊、中国科技核心期刊、湖南省十佳科技期刊、中国期刊全文数据库及中国核心期刊(遴选)数据库全文收录期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊,“桥梁工程与隧道工程”栏目荣获首届(2008年)湖南省优秀栏目,2009年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,多次被评为交通部、湖南省优秀期刊。

2023年《中外公路》为大16开,每册定价15.00元,全年6期共90.00元。

邮发代号:42-63。读者也可通过邮局或银行汇款至编辑部直接订阅。

地址:长沙理工大学云塘校区58号信箱

邮编:410114

收款单位:《中外公路》编辑部

户名:长沙理工大学

账号:190101600910988886

开户行:工商银行长沙银迅支行

电话:0731-85258033(带传真)

联系人:白雪

E-mail: zhongwaigonglu@vip.163.com