

重载交通下 SMA 高温稳定性影响因素研究

匡强¹, 周再恒², 徐程³

(1.佛山市公路桥梁工程监测站有限公司, 广东 佛山 528000; 2.广东云茂高速公路有限公司, 广东 广州 511440;

3.湖南建工交通建设有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 通过汉堡车辙仪对环境、级配(粗细)、木质素纤维掺量、温度进行均匀正交试验及方差分析, 检验沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)高温稳定性影响因素。结果表明, 不同因素对混合料高温性能的影响差异明显, 环境>级配(粗细)>温度>木质素纤维掺量; 在不同环境中, 高温性能影响强弱为水浴>空气浴; 不同级配混合料中, 高温性能优劣依次为粗>中>细; 在高温重载条件下, 不论是在空气中还是水浴中, SMA-13 均具备较好的高温稳定性; 使用 60 °C 作为评价控制温度, 在空气或水浴环境下均能较好地评价 SMA-13 沥青混合料的高温性能。

关键词: 公路; 重载交通; 沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA); 高温稳定性

中图分类号: U418.6

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)05-0075-05

近年来, 随着交通量及车辆轴载的急剧增加, 沥青路面出现了较多不良病害。尤其是南方地区受高温环境作用的影响, 重载高温下的沥青路面承受更多考验。而中国应用最广泛的普通密级配沥青混合料受级配组成理论所限, 很难较好地解决这一问题。沥青玛蹄脂碎石混合料(SMA)是在德国浇注式沥青砼的基础上发展而来的一种新型混合料, 其主要依靠间断级配理论和纤维沥青胶浆填充理论, 近年在湖南、江西、广西、广东等南方地区得到推广应用。但由于南方地区存在的重载交通导致 SMA 路面高温稳定性较难控制。该文对环境、级配(粗细)、木质素纤维掺量、温度等高温稳定性影响因素展开研究, 为提高 SMA 高温稳定性提供参考。

1 原材料性能

1.1 沥青

采用壳牌 SBS 改性沥青, 其性能指标达到中国 I-D、SHRP PG76-22 级要求(见表 1)。

1.2 集料填料

考虑到中国严重的重载和超载情况, 根据国内大量研究成果, 岩石的硬度较高或石质较好的粗集料有利于混合料的抗车辙性能。集料采用广西贵港辉绿岩, 矿粉由石灰岩磨细而成, 同时采用 32.5 MPa 水泥提高集料与沥青的黏附性。各集料的技术指标见表 2、表 3。

1.3 纤维

采用江苏理想环球新材料有限公司生产的絮状

木质素纤维, 其技术指标见表 4。

1.4 合成级配

采用 SMA-13 级配, 通过捣实试验确定捣实骨架空隙率 VCA_{DRC} , 然后根据设计级配选取 3 组

表 1 SBS 改性沥青的技术指标

项目	规范要求	测试结果	
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	40~55	54	
针入度指数	≥0	0.03	
延度(5 °C, 5 cm/min)/cm	≥25	30	
软化点 $T_{R\&B}$ /°C	≥75	84.5	
布氏旋转黏度(135 °C)/(Pa·s)	≤3	2.80	
闪点/°C	≥230	280	
溶解度/%	≥99	99.65	
弹性恢复(25 °C)/%	≥90	97.0	
储存稳定性离析(48 h 软化点差)/°C	≤1.0	0.6	
密度(25 °C)/(g·cm ⁻³)	—	1.028	
薄膜加热后	质量变化/%	-1.0~1.0	0.2
	针入度比(25 °C)/%	≥65	85
	残留延度(5 °C)/cm	≥15	17

表 2 矿粉的技术指标

项目	规范要求	测试结果
表观密度/(g·cm ⁻³)	≥2.5	2.754
亲水系数/%	<1	0.67
<0.6 mm 含量/%	100	100.0
<0.15 mm 含量/%	90~100	99.8
<0.075 mm 含量/%	75~100	95.0

表3 集料的技术指标

集料类型	项目	规范要求	测试结果
粗集料	石料压碎值/%	≤22	9.5
	洛杉矶磨耗值/%	≤24	8.6
	针片状颗粒含量/%	5~10 mm ≤12	1.5
	10~15 mm ≤8	1.4	
	<0.075 mm 含量/%	5~10 mm ≤1	0.1
	10~15 mm ≤1	0.3	
	吸水率/%	5~10 mm ≤2.0	0.60
	10~15 mm ≤2.0	0.50	
	表观相	5~10 mm ≥2.60	2.920
	对密度	10~15 mm ≥2.60	2.894
机制砂	表观密度/(g·cm ⁻³)	≥2.5	2.744
	砂当量/%	≥70	74
	<0.075 mm 含量/%	0~12	11

表4 木质素纤维的技术指标

项目	测试结果
纤维长度/mm	3
灰分含量/%	22
pH 值	>7
吸油率	≥纤维质量的5倍

不同的级配,其差异主要以 4.75 mm 筛孔通过率来反映。合成级配见表 5。

表5 SMA 的合成级配

筛孔尺寸/mm	通过率/%		
	1# 级配(粗)	2# 级配(中)	3# 级配(细)
19.000	100.0	100.0	100.0
16.000	99.7	99.7	99.7
13.200	84.0	84.0	84.0
9.500	61.2	61.2	61.3
4.750	25.6	28.1	30.6
2.360	15.6	17.3	19.0
1.180	14.0	15.2	16.4
0.600	12.7	13.4	14.2
0.300	11.7	12.2	12.6
0.150	11.1	11.3	11.5
0.075	10.4	10.5	10.6

由表 5 可知:3 组级配通过控制 4.75 mm 筛孔通过率来实现,填料为水泥与矿粉的混合物(水泥:矿粉=2:7),控制空隙率 3%~4.5% 为最佳油石比初选依据。成型马歇尔试件进行试验,结果见表 6。

表6 马歇尔试验结果

油石比/%	空隙率/%		
	1# 级配(粗)	2# 级配(中)	3# 级配(细)
5.9	5.3	4.7	3.8
6.2	4.7	3.9	2.9
6.5	4.0	3.0	2.1

由表 6 可知:1# 级配(粗)、2# 级配(中)、3# 级配(细)的最佳油石比分别为 6.5%、6.2%、5.9%。

2 正交试验设计

通过均匀正交设计试验探讨环境、级配(粗细)、木质素纤维掺量、温度对 SMA 高温稳定性的影响程度及对应评价指标,采用德国 infraTest 轮碾成型机成型试件、infraTest 汉堡车辙仪进行试验。

2.1 影响因素

油石比与级配固定对应,因此选取油石比与级配(粗细)、木质素纤维掺量、温度(空气、水浴温度)作为分析对象,每个因素选取 3 个水平进行正交试验(见表 7)。

表7 正交试验设计

因素水平	级配粗细	木质素纤维掺量/%	温度(空气、水浴)/℃
1	1# 级配(粗)	0.3	50
2	2# 级配(中)	0.4	60
3	3# 级配(细)	0.5	70

2.2 评价指标

沥青混合料高温性能的主要评价指标为马歇尔稳定度及车辙动稳定度。考虑到欧盟 EN 12697-22 规范《热拌沥青混合料的轮辙试验方法》、美国 AASHTO T324-04《汉堡车辙仪规范》及中国规范 JTG E20-2011《沥青及沥青混合料试验规程》中沥青混合料车辙试验的参数设置、条件均有所不同,主要按照欧盟 EN 12697-22、美国 AASHTO T324-04 的试验参数及条件设置,空气浴下试验轮载使用橡胶轮,水浴下试验轮载使用钢轮。为更好地模拟重载交通下沥青路面的性能,荷载选为 1.4 MPa,高于国内规范要求 0.7 MPa,加载速率均为 52 次/min,次数上限为 20 000 次,车辙深度上限为 20 mm。以车辙变形率为评价指标,其值越小,混合料的高温稳定性能越好。表达式如下:

$$r_{RD} = RD/t \quad (1)$$

式中: r_{RD} 为车辙变形率(mm/h); RD 为最大车辙深度(mm); t 为荷载作用时间(h), $t = n/(52 \times 60)$; n

为最大车辙深度时的荷载作用次数。

由于马歇尔试验的成型方式不同,同时现场的相关性不如轮碾成型模拟路面压实效果,故取车辙试件相同成型条件下德国 infraTest 轮碾成型机成型的试件钻芯取样(见图 1),并在与车辙试件相同的养护条件下进行马歇尔试验。

2.3 正交试验方案

依照上述影响因素及不同水平数,忽略交互作用,选取 L9(3³)正交表开展试验。空气浴与水浴下



图 1 马歇尔试件

正交试验设计方案分别见表 8、表 9。

表 8 正交试验方案及结果(空气浴)

试验编号	不同因素水平组合			试验结果		
	级配类型	木质素纤维掺量/%	温度(空气)/°C	马歇尔稳定度/kN	作用次数/次	车辙变形率/(mm·h ⁻¹)
1-1	A1(1#号级配(粗))	B1(0.3)	C1(50)	17.63	20 000	0.75
1-2	A1(1#号级配(粗))	B2(0.4)	C2(60)	15.99	20 000	0.86
1-3	A1(1#号级配(粗))	B3(0.5)	C3(70)	13.01	20 000	1.08
2-1	A2(2#号级配(中))	B1(0.3)	C2(60)	11.97	20 000	1.18
2-2	A2(2#号级配(中))	B2(0.4)	C3(70)	9.84	20 000	1.36
2-3	A2(2#号级配(中))	B3(0.5)	C1(50)	15.15	20 000	0.90
3-1	A3(3#号级配(细))	B1(0.3)	C3(70)	6.93	20 000	1.62
3-2	A3(3#号级配(细))	B2(0.4)	C2(60)	8.16	20 000	1.44
3-3	A3(3#号级配(细))	B3(0.5)	C1(50)	11.13	20 000	1.22

表 9 正交试验方案及结果(水浴)

试验编号	不同因素水平组合			试验结果		
	级配类型	木质素纤维掺量/%	温度(水浴)/°C	马歇尔稳定度/kN	作用次数/次	车辙变形率/(mm·h ⁻¹)
4-1	A1(1#号级配(粗))	B1(0.3)	C1(50)	20.13	20 000	1.62
4-2	A1(1#号级配(粗))	B2(0.4)	C2(60)	17.56	20 000	1.91
4-3	A1(1#号级配(粗))	B3(0.5)	C3(70)	15.01	20 000	2.41
5-1	A2(2#号级配(中))	B1(0.3)	C2(60)	14.75	20 000	2.63
5-2	A2(2#号级配(中))	B2(0.4)	C3(70)	12.76	15 201	4.10
5-3	A2(2#号级配(中))	B3(0.5)	C1(50)	16.01	20 000	2.07
6-1	A3(3#号级配(细))	B1(0.3)	C3(70)	10.44	2 700	23.11
6-2	A3(3#号级配(细))	B2(0.4)	C2(60)	12.26	8 951	6.97
6-3	A3(3#号级配(细))	B3(0.5)	C1(50)	13.72	17 601	3.55

3 试验结果分析

正交试验结果见表 8、表 9 和图 2、图 3。

3.1 直观分析

从表 8、表 9、图 2、图 3 可看出:1) 在高温重载条件下,不论是在空气中还是水浴中,SMA-13 均具备较好的高温稳定性。2) 在重载 1.4 MPa 条件下,在 60 °C 空气或水浴环境下,试验数据较均匀且能较好地评价 SMA-13 沥青混合料的高温性能。

3) 不同因素对 SMA-13 混合料在高温重载条件下高温稳定性的影响强弱为环境>级配(粗细)>温度>木质素纤维掺量。4) 在选定的两种试验环境中,在高温重载条件下环境对 SMA-13 混合料高温稳定性的影响强弱为水浴>空气浴。这主要是水在车辙往返过程中与温度对车辙试件的耦合作用对孔隙的冲刷更明显,同时增加了动水压力,使在水浴条件下高温抗车辙性能更差。5) 不同级配(粗细) SMA-13 混合料的高温性能差异显著,在高温重载条件

下,在选定的粗、中、细级配混合料中,其高温性能优劣依次为粗>中>细。SMA-13混合料为骨架密实型级配,其含量较多的粗集料互相嵌锁组成高稳定性(抗变形能力强)的结构骨架,细集料和矿粉、沥青和纤维稳定剂组成的沥青玛蹄脂将骨架胶结一起,并填充骨架空隙,使混合料具有较好的柔性及耐久性,而粗级配的粗集料更多,骨架更密实,其高温抗车辙性能更好。

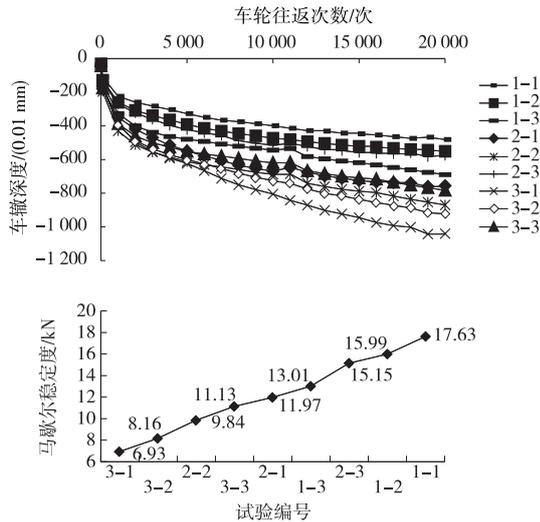


图2 正交试验结果(空气浴)

表10 正交试验方差分析结果(空气浴)

评价指标	方差来源	离差	自由度	均方离差	F 值	P-value	F-crit	显著性
马歇尔稳定度	级配粗细	69.49	2	34.75	6.03	0.04	5.14	√
	木质素纤维掺量	4.68	2	2.34	0.14	0.87	5.14	×
	温度	33.39	2	16.70	1.42	0.31	5.14	×
车辙变形率	级配粗细	0.42	2	0.21	5.18	0.05	5.14	√
	木质素纤维掺量	0.04	2	0.02	0.18	0.84	5.14	×
	温度	0.24	2	0.12	1.65	0.27	5.14	×

表11 正交试验方差分析结果(水浴)

评价指标	方差来源	离差	自由度	均方离差	F 值	P-value	F-crit	显著性
马歇尔稳定度	级配粗细	3.76	2	1.88	3.13	0.12	5.14	×
	木质素纤维掺量	1.39	2	0.69	0.06	0.94	5.14	×
	温度	22.68	2	11.34	1.49	0.30	5.14	×
车辙变形率	级配粗细	154.60	2	77.30	2.10	0.20	5.14	×
	木质素纤维掺量	67.22	2	33.61	0.65	0.55	5.14	×
	温度	94.12	2	47.06	1.00	0.42	5.14	×

从表10、表11可看出:1)在空气浴中,木质素纤维掺量及温度对马歇尔稳定度与车辙变形率的影响不显著;在水浴中,级配(粗细)、温度、木质素纤维掺量对马歇尔稳定度与车辙变形率的影响均不显著。与实际不符,这是因为该文在高温重载条件下

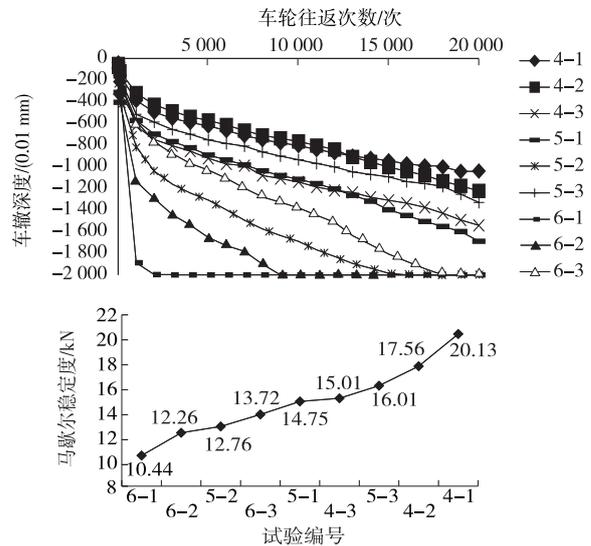


图3 正交试验结果(水浴)

3.2 方差分析

在同一环境及重载 1.4 MPa 条件下,级配(粗细)、木质素纤维掺量和温度等因素对 SMA-13 混合料高温性能的影响均具备一定的交联耦合作用,故引入单因素方差,分别对级配(粗细)、木质素纤维掺量和温度等进行分项方差分析,结果见由表10、表11。

开展试验,同时环境对其影响较大,导致选定因素对高温性能的影响被弱化。2)在空气浴中,级配(粗细)对马歇尔稳定度及车辙变形率的影响显著,不同因素对 SMA 混合料在高温重载条件下高温稳定性的影响强弱为级配(粗细)>温度>木质素纤维掺

量,与 3.1 节结论相同。可见,级配(粗细)在高温重载条件下是影响混合料高温性能的关键。

4 结论

(1) SMA-13 在高温重载条件下性能优异,同时具有较高的行车舒适性、安全性,建议在高温、重载及多雨地区优先作为路面级配类型使用,以达到较好的沥青路面性能,减少养护成本。

(2) 在同一环境下,级配(粗细)是影响 SMA-13 高温稳定性的主要因素;温度高低对 SMA-13 高温稳定性的影响较大;木质素纤维掺量增加可改善 SMA-13 的高温抗车辙性能。

(3) 在水浴中,级配(粗细)、温度、木质素纤维掺量对 SMA-13 马歇尔稳定度与车辙变形率的影响均不显著,说明在重载地区,高温与雨水是 SMA 路面的主要影响因素。

(4) 在交通量较大的南方湿热地区,沥青路面面层推荐最佳组合为 A1B2,即粗级配 SMA-13,木质素纤维掺量为 0.4%。

参考文献:

[1] 关宏信,张起森,刘敬.沥青混合料车辙试验改进方法

[J].交通运输工程学报,2011,11(3):16-21.

[2] 刘至飞,丁敏.长期服役沥青路面面层材料汉堡车辙试验研究[J].公路工程,2018,43(3):225-228.

[3] 蒋功雪,彭红卫,孙超林,等.湖南省高速公路沥青路面车辙病害调查与原因分析[J].公路工程,2011,36(1):1-3+7:225-228.

[4] 张争奇,罗要飞,张苛.不同抗车辙剂对沥青混合料高温性能影响研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(5):964-970.

[5] LI Ping, WANG Xiuli, LI Huishan, et al. Influence factors and anti-rutting agent of high-temperature stability of asphalt mixture[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Traffic and Transportation Studies. Kunming, China: American Society of Civil Engineers, 2010: 1293-1302.

[6] 吴传海.重载交通沥青路面车辙成因及混合料组成设计研究[D].西安:长安大学,2008.

[7] XIAO Feipeng, AMIRKHANIAN SerjiN, JUANG C Hsein. Rutting resistance of rubberized asphalt concrete pavements containing reclaimed asphalt pavement mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19(6): 475-483.

收稿日期:2020-03-23

参考文献:

[1] 关宏信,张起森,刘敬.沥青混合料车辙试验改进方法

(上接第 63 页)

2.3.3 地表水引排处理

在滑动坡面上方坡侧设置梯形截水沟,防止坡体以外的表面水流入滑体。坡面及一级平台设截水沟,通过滑体两侧引流水沟排入路侧边沟,完善地表排水系统。截水沟采用 M7.5 浆砌片石砌筑。

3 治理方案效果分析

治理方案施工期为 2 个月,于 2016 年底完工。治理完成后,选取 5 个剖面进行稳定性计算,结果显示该区域边坡的稳定性系数均满足规范要求。同时于 2017 年 1—4 月每隔 15 d 对边坡水平、垂直方向的位移进行监测,结果显示两方向产生的位移均控制在 25 mm 以内。综上,治理方案有效。

4 结语

通过现场勘探,确定衡炎高速公路株洲段边坡水毁的类型、范围及严重程度,结合影像资料,分析该路段边坡水毁原因为区域独特的地质和地貌环境、气候、降水量及外在人力行为,并提出卸载土方

+ 整修边坡 + 人字骨架护坡 + 抗滑挡土墙 + 坡面截排水的综合治理方案,稳定性计算和位移监测结果表明该方案有效。

参考文献:

[1] 胡凤鉴.S302 线南平段某路堑边坡水毁滑坡稳定性分析及治理[J].福建交通科技,2018(4):38-40.

[2] 叶银英,周哈哈,张锐.广佛肇高速公路全风化花岗岩路基边坡水毁防治研究[J].公路与汽运,2014(7):133-136.

[3] 陈英毅.福州至永泰高速公路 K60+780~K60+965 段左侧边坡水毁应急抢险及处治方案[J].福建交通科技,2018(4):48-55.

[4] 王斌.山区高速公路边坡水毁综合治理措施分析[J].山西建筑,2017,43(15):134-136.

[5] 王国清.路基工程质量问题及防治措施百问[M].北京:人民交通出版社,2002.

[6] 李昌贤,张俊.漳龙高速公路某高边坡水毁滑坡分析及治理[J].北方交通,2009(6):21-23.

收稿日期:2019-07-19