

文章编号:1672-9331(2021)01-0016-08

# RIOHTrack 中面层沥青混合料高温性能 SPT 试验

查旭东<sup>1</sup>, 樊小林<sup>1</sup>, 刘安辉<sup>1</sup>, 王旭东<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 交通运输部 公路科学研究院, 北京 100088)

**摘要:** 为了优选沥青混合料高温性能的简单性能试验(simple performance test, SPT)的评价指标, 通过 SPT 复模量试验和重复荷载试验对交通运输部公路科学研究院足尺路面试验环道(full-scale test circular track in Research Institute of Highway, Ministry of Transport, RIOHTrack)所用 7 种中面层沥青混合料 AC-20 的高温性能进行了评价。采用动态模量、车辙因子、流变次数、永久应变与流变次数之比及永久应变斜率 5 个评价指标, 基于幂函数关系对相同及不同试验间的评价指标进行拟合, 分析各个指标间的相关性。研究结果表明: SPT 试验能有效评价沥青混合料的高温性能, 根据各个指标间相关性判定系数综合平均值的大小, 优选出车辙因子及永久应变斜率作为中面层沥青混合料高温性能的评价指标, 相应的评价结果具有良好的 consistency。

**关键词:** 沥青混合料; 简单性能试验; 高温性能; 车辙试验; 判定系数

**中图分类号:** U414

**文献标志码:** A

## SPT test of high temperature performance of asphalt mixture in middle surface layer of RIOHTrack

ZHA Xu-dong<sup>1</sup>, FAN Xiao-lin<sup>1</sup>, LIU An-hui<sup>1</sup>, WANG Xu-dong<sup>2</sup>

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Research Institute of Highway, Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To select the optimum evaluation indexes of simple performance test(SPT) for the high temperature performance of asphalt mixture, the complex modulus test and repeated load test of SPT were conducted to evaluate the high temperature performance of seven kinds of AC-20 asphalt mixtures in the middle surface layer of the full-scale test circular track in Research Institute of Highway, Ministry of Transport(RIOHTrack). By means of the five evaluation indexes of dynamic modulus, rutting factor, flow number, ratio of permanent strain to flow number and permanent strain slope, based on the power function relation, the evaluation indexes among the same tests and the different tests were fitted to analyze the correlations among various indexes. The research results show that the SPT can effectively evaluate the high temperature performance of asphalt mixture. According to the comprehensive average value of correlation determination coefficients among various

收稿日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878077);安徽省交通运输科技进步计划项目(201720);佛山市建盈发展有限公司科技项目(FS-XTNH-G-[2018]011)

通讯作者:查旭东(1970—),男,教授,主要从事道路工程方面的研究。E-mail: 1756023135@qq.com

indexes, the rutting factor and the permanent strain slope can be optimized and selected as the evaluation indexes of high temperature performance of asphalt mixture in the middle surface layer. The corresponding evaluation results have good consistency.

**Key words:** asphalt mixture; simple performance test; high temperature performance; rutting test; determination coefficient

车辙是沥青路面的主要病害形式之一,其不仅影响路面平整度和行车舒适性,且在雨天易积水而引起车轮漂滑,影响行车安全,故提高沥青路面的高温抗变形能力具有重要的现实意义。高温性能是沥青混合料设计的重要技术指标之一,现有的试验方法和评价指标较多。陈杰等<sup>[1]</sup>对沥青混合料高温性能的评价指标与其抗剪强度的相关性进行了研究,以此分析高温性能评价指标的适用性;杨博等<sup>[2]</sup>研制了一种组合结构车辙试模,并进行了车辙试验验证,分析了结构因素对高温性能的影响;朱浩然等<sup>[3]</sup>提出了既有路面分层结构的高温性能试验方法,分析了中面层沥青混合料高温性能的衰变规律;张争奇等<sup>[4]</sup>总结和探讨了汉堡车辙试验相关的试验条件、评价指标与计算方法等问题,可为规范评价混合料的高温性能和水稳定性提供指导;李胜<sup>[5]</sup>、宋云连等<sup>[6]</sup>、蒋洪涛等<sup>[7]</sup>采用车辙试验对沥青混合料的高温性能进行了评价;卢勇等<sup>[8]</sup>以江苏省某运营高速公路沥青路面为研究对象,通过汉堡车辙试验对其高温性能进行了分析评价;刘至飞等<sup>[9]</sup>对不同的沥青混合料进行了汉堡车辙试验,结果表明汉堡车辙试验可有效评价沥青混合料的高温性能;孔德胜<sup>[10]</sup>以 3 种不同级配的沥青混合料为研究对象进行了车辙试验,分析了动稳定度等与沥青混合料油石比及压实次数的关系;刘黎萍等<sup>[11]</sup>为分析沥青高温性能指标对沥青混合料高温性能的影响,对 6 种不同沥青的相关指标进行了测试,并以 AC-20 沥青混合料为研究对象进行了高温单轴贯入试验;王虎等<sup>[12]</sup>利用三轴重复荷载试验对沥青混合料的高温抗车辙性能进行了评价,并对试验数据进行拟合,得到了混合料的黏弹性参数;杨洋等<sup>[13]</sup>、张争奇等<sup>[14]</sup>通过 SPT 试验,优选了沥青混合料高温性能的相关评价指标;Apeagyei<sup>[15]</sup>采用

多元线性回归模型分析了流变次数与车辙因子和体积参数等之间的相关关系,结果表明它们之间相关性显著,流变次数可作为高温性能的评价指标;Al-Khateeb 等<sup>[16]</sup>采用 SPT 重复荷载试验研究了沥青混合料的高温性能;钟远帆<sup>[17]</sup>和刘安辉<sup>[18]</sup>进行了 SPT 动态模量和重复荷载试验,结果表明该试验可有效评价沥青混合料的高温性能。

由此可见,目前沥青混合料高温性能的评价方法有很多,室内试验的结果并不一定能准确地反映沥青路面的实际车辙状况,相对而言 SPT 试验结果可更好地表征路面的实际高温性能。为此,以交通运输部公路科学研究院足尺路面试验环道(full-scale test circular track in Research Institute of Highway, Ministry of Transport, RIOHTrack)<sup>[19]</sup>中所用 7 种中面层沥青混合料为研究对象,通过 SPT 复模量试验和重复荷载试验对其高温性能进行评价,并与我国标准 SRT、德国汉堡 HWTD、美国 APA 和法国 FRT 4 种车辙试验结果进行相关性分析,优选出合理的评价指标,从而为沥青混合料高温性能的评价提供参考依据。

## 1 配合比设计

### 1.1 原材料性能检验

RIOHTrack 中面层沥青混合料共有 7 种类型,其所用的沥青结合料包括秦皇岛 30 #、50 # 和 70 # 3 种道路 A 级石油沥青, I-D (SBS1) 和 I-DS10 (SBS2) 两种 SBS 改性沥青及胶粉掺量为 22% 的橡胶沥青 (AR), 集料为玄武岩粗集料和石灰岩细集料, 矿粉为石灰岩矿粉。经检验, 所用沥青和矿料的各项性能指标均符合技术要求。所用沥青的 3 大指标和密度试验结果如表 1 所示。

表 1 沥青主要性能的试验结果

Table 1 Test results of main performances of asphalt

沥青种类	5℃延度/ mm	10℃延度/ mm	15℃延度/ mm	25℃针入度/ (0.1 mm)	软化点/ ℃	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )
30#	—	—	脆断	22	61.0	1.038
50#	—	119	1 326	52	52.5	1.031
70#	—	373	>1 500	72	48.5	1.029
SBS1	285	487	—	63	72.5	1.024
SBS2	294	479	—	63	75.5	1.025
AR	67	—	—	38	70.0	—

## 1.2 配合比设计

中面层沥青混合料的级配类型为 AC-20, 根据通过 2.36 mm 筛孔的质量百分率相差 5% 的原则, 选用 3 种合成级配, 如表 2 所示。其中, 级配Ⅱ最粗, 级配Ⅲ最细, 级配Ⅰ介于二者之间。据

此, 采用不同的沥青结合料制备 7 种 AC-20 沥青混合料, 通过配合比设计得到各混合料的最佳油石比, 如表 3 所示。在 70#-K-Ⅱ和 70#-R-Ⅲ中分别掺加了占沥青质量 8% 的 RA 抗车辙剂(K) 和占矿料质量 40% 的旧 RAP 沥青混合料(R)。

表 2 中面层 AC-20 混合料合成级配

Table 2 Composite gradations of AC-20 mixtures in middle surface layer

级配 类型	通过下列筛孔(mm)的质量百分率/%									
	19	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Ⅰ	100.0	72.9	52.6	30.4	21.1	14.7	12.0	9.5	7.7	5.9
Ⅱ	100.0	70.3	49.4	25.1	16.6	12.2	10.4	8.6	7.3	5.8
Ⅲ	100.0	84.0	62.6	32.7	26.1	18.4	14.4	10.7	9.3	7.5

表 3 中面层 AC-20 混合料最佳油石比

Table 3 Optimal asphalt-aggregate ratios of AC-20 mixtures in middle surface layer

序号	AC-20 混合料	最佳油石比/%
1	30#-Ⅰ	4.6
2	50#-Ⅰ	4.3
3	SBS1-Ⅰ	4.5
4	SBS2-Ⅱ	4.5
5	AR-Ⅱ	5.7
6	70#-K-Ⅱ	4.9
7	70#-R-Ⅲ	3.1

## 2 SPT 复模量试验

### 2.1 试验方案及评价指标

将 SPT 复模量试验所用的沥青混合料试件旋转压实成型, 并将其钻芯打磨成直径 100 mm、高 150 mm 的圆柱体试件。设置 SPT 试验参数

为: 70, 100 με 两种应变水平; 5, 15, 20, 30, 40, 50℃ 6 种温度条件; 25, 20, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.01 Hz 10 种加载频率。由于 RIOHTrack 加载车的行驶速度约为 30 km/h, 其作用频率与 5 Hz 相当, 以此作为基准频率构造动态模量主曲线, 从而可得到 60℃ 扩展温度下的动态模量  $|E^*|$  和相位角  $\varphi$ 。以  $|E^*|$  和车辙因子  $|E^*|/\sin\varphi$  两个指标评价中面层 AC-20 混合料的高温性能。分别采用 Boltzman 函数和 Gauss Amp 函数对  $|E^*|$  和  $\varphi$  的主曲线进行拟合。

$$\lg|E^*| = \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(T-T_0)/T_x}} + A_2 \quad (1)$$

$$\varphi = \varphi_0 + A e^{-(T-T_c)^2/(2w^2)} \quad (2)$$

式中:  $|E^*|$  为动态模量, MPa;  $\varphi$  为相位角, (°);  $T$  为温度, °C;  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $T_0$ 、 $T_x$  为  $|E^*|$  主曲线的回归参数;  $\varphi_0$ 、 $A$ 、 $T_c$ 、 $w$  为  $\varphi$  主曲线的回归参数。

### 2.2 试验结果分析

根据每组 3 个平行试件的试验结果, 分析汇

总得到 7 种中面层 AC-20 混合料在基准频率 5 Hz 下的 $|E^*|$ 和 $\varphi$ 主曲线参数,如表 4 所示。随温度变化的主曲线见图 1 和图 2。

表 4 基准频率下 AC-20 混合料各主曲线参数

Table 4 Various master curve parameters of AC-20 mixtures at reference frequency

AC-20 混合料	$ E^* $ 主曲线参数				$\varphi$ 主曲线参数			
	$A_1$	$A_2$	$T_0$	$T_x$	$\varphi_0$	$A$	$T_c$	$w$
30#-I	4.60	1.37	54.88	16.03	4.18	29.48	51.86	22.23
50#-I	4.62	1.58	46.12	15.87	3.43	29.05	45.00	24.43
SBS1-I	4.54	2.13	38.56	15.26	3.55	27.43	41.89	26.31
SBS2-II	4.54	1.79	41.41	17.54	4.22	26.53	41.88	26.70
AR-II	4.46	1.65	48.08	17.35	4.13	24.83	46.84	25.89
70#-K-II	4.56	1.73	44.87	17.56	1.66	29.32	45.70	28.86
70#-R-III	4.54	1.94	42.04	14.39	4.94	27.88	43.95	22.04

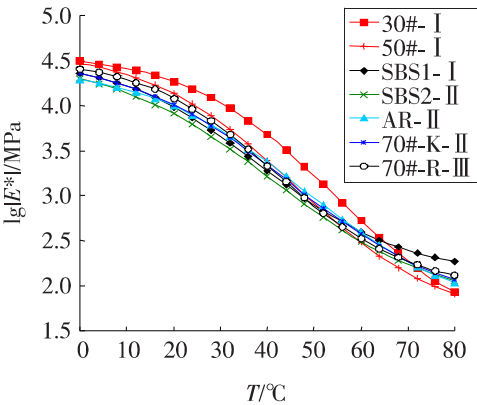


图 1 基准频率下 AC-20 混合料动态模量主曲线

Fig. 1 Dynamic modulus master curves of AC-20 mixtures at reference frequency

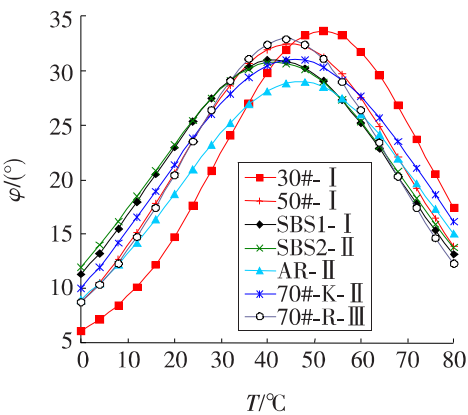


图 2 基准频率下 AC-20 混合料相位角主曲线

Fig. 2 Phase angle master curves of AC-20 mixtures at reference frequency

根据主曲线可得到 60 °C 扩展温度下的 $|E^*|$ 、 $\varphi$ 和 $|E^*|/\sin\varphi$ 的结果及 AC-20 混合料高温性能的优劣排序,如表 5 所示。

表 5 AC-20 混合料 SPT 复模量试验评价结果

Table 5 Evaluation results of SPT complex modulus test for AC-20 mixtures

AC-20 混合料	$ E^* $ / MPa	$\varphi$ / (°)	$ E^* /\sin\varphi$ / MPa	排序
30#-I	534	31.7	1 016	1
50#-I	300	27.5	651	7
SBS1-I	399	25.2	938	2
SBS2-II	314	25.3	735	6
AR-II	390	26.0	891	3
70#-K-II	372	27.6	803	4
70#-R-III	335	26.3	754	5

通过分析表 5 可知:① 采用动态模量 $|E^*|$ 和车辙因子 $|E^*|/\sin\varphi$ 对 7 种中面层 AC-20 混合料的高温性能进行评价,所得优劣排序结果完全相同,说明二者均可作为 SPT 复模量试验高温性能的评价指标,且评价结果具有很好的一致性。② 在相同的级配条件下,级配 I 的 3 种不同沥青结合料 AC-20 的高温性能优劣排序为 30#>SBS1>50#,且在 7 种混合料中,30#-I 的高温性能最佳,而 50#-I 的高温性能最差,前者的 $|E^*|$ 和 $|E^*|/\sin\varphi$ 分别是后者的 1.78 倍和 1.56 倍,表明尽可能降低沥青标号及采用 SBS 改性沥青可有效提高混合料的高温抗车辙能力;级配 II 的 3 种不同改性沥青 AC-20 混合料的高温性能优劣排序为 AR>70#-K>SBS2,说明橡胶沥青和 RA 抗车辙剂能较好地改善混合料的高温性能。③ 70#-R-III 的高温性能优于 50#-I 和 SBS2-II,说明虽然再生沥

青混合料级配偏细,但老化的旧 RAP 混合料的掺入有利于提高混合料高温抗变形性能。④与普通沥青混合料相比,SBS、AR 和掺加 RA 抗车辙剂的改性沥青混合料 AC-20 的  $|E^*|$  随温度的变化幅度较小。在温度超过 72 °C 后,改性沥青混合料的高温性能优于普通沥青混合料的,表明前者兼具良好的高温和低温性能,而后者在高温阶段的稳定性相对欠佳。

### 3 SPT 重复荷载试验

#### 3.1 试验方案及评价指标

SPT 重复荷载试验所用试件与复模量试验的相同,设置试验参数为:温度 60 °C,偏应力

600 kPa,接触应力 30 kPa,无围压。试验终止条件为:10 000 次荷载循环或试件产生 5% 的累积永久变形。通常,在重复荷载作用下随循环加载次数的增加,沥青混合料永久变形的累积过程可分为迁移期、稳定期和破坏期 3 个阶段。故 SPT 重复荷载试验的高温性能评价指标主要有:① 流变次数  $F_N$ ,其定义为稳定期和破坏期分界点对应的加载次数;② 组合参数  $\epsilon_p/F_N$ ,其中  $\epsilon_p$  为流变次数对应的永久应变;③ 稳定期永久应变随加载次数变化的斜率  $c$ 。

#### 3.2 试验结果分析

由每组 3 个平行试件的 SPT 重复荷载试验可得到 7 种中面层 AC-20 混合料的高温性能评价指标,其结果及优劣排序如表 6 所示。

表 6 AC-20 混合料 SPT 重复荷载试验评价结果

Table 6 Evaluation results of SPT repeated load test for AC-20 mixtures

AC-20 混合料	$F_N$		$\epsilon_p$		$\epsilon_p/F_N$		$c$	
	结果/ 次	排序	结果/ ( $\times 10^2 \mu\epsilon$ )	排序	结果/ ( $\mu\epsilon \cdot \text{次}^{-1}$ )	排序	结果/ ( $\mu\epsilon \cdot \text{次}^{-1}$ )	排序
30 # - I	613	3	141	3	23.2	2	10.9	2
50 # - I	209	7	134	1	69.3	7	31.7	7
SBS1 - I	1 148	1	171	5	15.1	1	4.8	1
SBS2 - II	354	5	188	6	54.0	6	22.7	6
AR - II	405	4	163	4	40.6	4	18.6	5
70 # - K - II	329	6	138	2	44.2	5	15.6	4
70 # - R - III	627	2	201	7	32.3	3	14.2	3

分析表 6 可知:①  $F_N$ 、 $\epsilon_p/F_N$  和  $c$  3 个指标对沥青混合料高温性能的评价结果总体一致,高温性能最佳的均为 SBS1-I,而最差的均为 50 # -I,前者的流变次数  $F_N$  是后者的 5.49 倍,而后者的组合参数  $\epsilon_p/F_N$  和永久应变斜率  $c$  分别是前者的 4.59 倍和 6.60 倍;同时, $\epsilon_p/F_N$  和  $c$  的评价排序除 AR-II 和 70 # -K-II 出现调换外,其余均一致。因此,SPT 重复荷载试验采用  $F_N$ 、 $\epsilon_p/F_N$  和  $c$  3 个指标评价沥青混合料的高温性能是合理的。② 对于级配 I 的 3 种不同沥青结合料的 AC-20 混合料,3 个指标的优劣排序均为  $\text{SBS1} > 30 \# > 50 \#$ ,表明 SBS 改性沥青能有效提高沥青混合料的高温性能;同时,30 # -I 的  $F_N$  值是 50 # -I 的 2.93 倍,说明标号越低的石油沥青对混合料高温性能的改善作用越大。对于级配 II 的 3 种不同改性沥青结

合料的 AC-20 混合料,3 个指标的优劣排序虽然各不相同,但总体排序均在第 4~6 位,说明不同改性剂对高温性能的改善效果各有特点,难以简单地区分优劣。③ 70 # -K-II 和 70 # -R-III 的高温性能均优于低标号 50 # -I 的高温性能,且 70 # -R-III 总体排在前列,表明在高标号沥青中掺加抗车辙剂或旧 RAP 混合料可以明显提高混合料的高温抗变形能力。

### 4 相关性分析

前述分析表明,SPT 复模量试验的动态模量  $|E^*|$  和车辙因子  $|E^*|/\sin\varphi$  两个指标,以及 SPT 重复荷载试验的流变次数  $F_N$ 、组合参数  $\epsilon_p/F_N$  和永久应变斜率  $c$  3 个指标都能合理地评价沥青混



合料的高温性能,且具有良好的 consistency,但各指标对 7 种中面层 AC-20 混合料评价的排序结果仍存在一定差异。为进一步检验评价结果的合理性,结合我国标准 SRT、德国汉堡 HWTD、美国 APA 和法国 FRT 4 种车辙试验结果,对各评价指标进行相关性分析,从而优选出与其他评价指标之间

相关性最显著的 SPT 试验指标,并作为沥青混合料高温性能的评价指标。4 种车辙试验结果汇总如表 7 所示,其中,SRT、HWTD、APA 和 FRT 选取的评价指标分别为动稳定度  $D_s$ 、车辙变形率  $R_d$ 、最大车辙深度  $A_d$  和相对变形  $P$ 。

表 7 AC-20 混合料车辙试验结果汇总  
Table 7 Summary of rutting test results for AC-20 mixtures

AC-20 类型	SRT		HWTD		APA		FRT	
	$D_s$ / (次·mm <sup>-1</sup> )	排序	$R_d$ / (mm·h <sup>-1</sup> )	排序	$A_d$ / mm	排序	$P$ / %	排序
30#-I	7 144	4	0.476	6	1.96	5	2.79	5
50#-I	2 369	7	0.394	5	2.04	6	3.06	7
SBS1-I	7 952	2	0.292	2	0.90	1	1.93	2
SBS2-II	5 654	5	0.237	1	1.30	2	2.89	6
AR-II	4 360	6	0.311	3	1.62	3	2.01	3
70#-K-II	7 995	1	0.355	4	1.67	4	2.31	4
70#-R-III	7 342	3	0.665	7	2.09	7	1.43	1

从表 5~7 可以看出,用不同车辙试验方法评价的 7 种中面层 AC-20 混合料的高温性能排序结果差异较大,反映了沥青混合料高温性能的试验方法和评价指标多且结果较难统一的问题。为此,采用幂函数关系分析各评价指标之间的相关

性,且不考虑同一指标的判定系数  $R^2$  的值。先对同一试验方法多个指标间的  $R^2$  取均值,再对不同试验方法间的  $R^2$  取均值,计算得到各指标间  $R^2$  的综合均值,结果如表 8 所示。

表 8 不同评价指标之间的相关性判定系数  
Table 8 Correlation determination coefficients among various evaluation indexes

评价指标	SPT 复模量		SPT 重复荷载			$D_s$	$R_d$	$A_d$	$P$
	$ E^* $	$ E^* /\sin\varphi$	$F_N$	$\epsilon_p/F_N$	$c$	(SRT)	(HWTD)	(APA)	(FRT)
$ E^* $	—	0.876	0.287	0.472	0.346	0.248	0.029	0.001	0.000
$ E^* /\sin\varphi$	0.876	—	0.508	0.664	0.558	0.356	0.000	0.102	0.031
$F_N$	0.287	0.508	—	0.935	0.893	0.521	0.015	0.289	0.333
$\epsilon_p/F_N$	0.472	0.664	0.935	—	0.952	0.481	0.017	0.247	0.205
$c$	0.346	0.558	0.893	0.952	—	0.531	0.000	0.383	0.202
$D_s$	0.248	0.356	0.521	0.481	0.531	—	0.014	0.120	0.233
$R_d$	0.029	0.000	0.015	0.017	0.000	0.014	—	0.525	0.200
$A_d$	0.001	0.102	0.289	0.247	0.383	0.120	0.525	—	0.005
$P$	0.000	0.031	0.333	0.205	0.202	0.233	0.200	0.005	—
$R^2$ 综合均值	0.254	0.324	0.412	0.410	0.415	0.236	0.153	0.202	0.140

通过分析表 8 可知:  
① SPT 复模量试验的  $|E^*|$  与  $|E^*|/\sin\varphi$  两个指标间,以及 SPT 重复荷载试验的  $F_N$ 、 $\epsilon_p/F_N$

与  $c$  3 个指标间的  $R^2$  值均超过 0.85,且后者的  $R^2$  值更高,表明同一试验方法不同指标间的相关性显著,故可取其中 1 个指标作为相应试验方法

评价沥青混合料高温性能的指标。

② 对于 SPT 复模量试验,  $|E^*|/\sin\varphi$  与其他试验指标间的  $R^2$  综合均值比  $|E^*|$  高出 27.6%, 说明车辙因子是该试验方法较优的沥青混合料高温性能评价指标;而 SPT 重复荷载试验的 3 个指标与其他试验指标间的  $R^2$  综合均值相差不大, 都在 0.41~0.42 之间, 说明均可作为该试验方法评价沥青混合料高温性能的指标, 相对而言, 永久应变斜率  $c$  对应的  $R^2$  综合均值最大, 可作为较优的评价指标。

③ 对于 4 种车辙试验方法, 除 HWTD 与 APA 之间的相关性较好外, 其余各车辙试验之间的相关性较差。SRT 的  $R^2$  综合均值最大, 且与 SPT 试验之间具有较好的相关性, 表明我国标准 SRT 仍是一种较合理的评价沥青混合料高温性能的试验方法。

## 5 结论

通过对 RIOHTrack 所用 7 种中面层沥青混合料 AC-20 进行 SPT 复模量和重复荷载试验, 分别采用不同的指标评价了相应的高温性能, 并与我国标准 SRT、德国汉堡 HWTD、美国 APA 和法国 FRT 4 种车辙试验进行了相关性分析, 得到以下结论:

1) SPT 复模量试验主要有动态模量  $|E^*|$  和车辙因子  $|E^*|/\sin\varphi$  两个评价指标, 所得的各 AC-20 混合料高温性能的优劣排序结果完全一致, 且二者之间相关性显著, 说明二者均可作为高温性能的评价指标, 但  $|E^*|/\sin\varphi$  与各车辙试验结果之间的相关性更强, 故车辙因子是 SPT 复模量试验较优的评价指标。

2) SPT 重复荷载试验主要有流变次数  $F_N$ 、组合参数  $\epsilon_p/F_N$  和永久应变斜率  $c$  3 个指标, 其对各 AC-20 混合料高温性能评价的优劣排序结果总体一致, 且三者之间的相关性显著, 说明三者均可用于评价沥青混合料的高温性能, 其中  $c$  与各车辙试验结果之间的相关性略强, 表明永久应变斜率是 SPT 重复荷载试验的较优评价指标。

3) 掺加低标号道路石油沥青、SBS 改性沥青、橡胶沥青、抗车辙剂和旧 RAP 混合料等措施均能有效地提高 AC-20 混合料的高温抗车辙能力, 但

不同试验方法的评价结果存在一定的差异, 反映了各试验方法对结合料、改性剂和级配的影响的敏感程度不同。

由于本研究主要是通过室内车辙试验来评价沥青混合料的高温性能, 实际的沥青路面的抗车辙效果有待后续结合 RIOHTrack 现场加速加载试验的车辙检测结果进行进一步验证。

## 〔参考文献〕

- [1] 陈杰, 禰炜安, 熊剑平, 等. 沥青混合料高温性能评价指标研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 268-272.  
CHEN Jie, XUAN Wei-an, XIONG Jian-ping, et al. Research on evaluation index of high temperature performance of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(2): 268-272.
- [2] 杨博, 张争奇. 沥青路面组合结构车辙试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(7): 46-50.  
YANG Bo, ZHANG Zheng-qi. Composite structure wheel tracking test of asphalt pavement[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(7): 46-50.
- [3] 朱浩然, 蔡海泉, 任奇, 等. 既有沥青路面中面层高温性能发展规律试验分析[J]. 公路, 2020, 65(8): 17-22.  
ZHU Hao-ran, CAI Hai-quan, REN Qi, et al. Experiment and analysis on the development law of high temperature performance of existing asphalt pavement[J]. Highway, 2020, 65(8): 17-22.
- [4] 张争奇, 罗要飞, 张苛. 沥青混合料汉堡车辙试验评价研究综述[J]. 材料导报, 2017, 31(3): 96-105.  
ZHANG Zheng-qi, LUO Yao-fei, ZHANG Ke. Review on Hamburg wheel-track device evaluation of asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2017, 31(3): 96-105.
- [5] 李胜. 不同改性剂对沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 公路与汽运, 2020(6): 65-68.  
LI Sheng. Research on the influence of different modifiers on the road performance of asphalt mixture[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(6): 65-68.
- [6] 宋云连, 吕鹏, 张杨, 等. 温拌沥青混合料高温性能试验研究[J]. 公路工程, 2018, 43(5): 69-73.  
SONG Yun-lian, LYU Peng, ZHANG Yang, et al. Experimental study on high temperature perform-

- ance of warm mix asphalt mixture[J]. Highway Engineering, 2018, 43(5): 69-73.
- [7] 蒋洪涛,朱德武,孙春阳,等. 植物基复配沥青混合料的蠕变性能[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2018, 15(1): 36-40.
- JIANG Hong-tao, ZHU De-wu, SUN Chun-yang, et al. Preparation of bio-binder compound modified asphalt HMA creep property[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2018, 15(1): 36-40.
- [8] 卢勇,刘爱华,张文浩,等. 基于汉堡车辙试验的在役高速公路沥青路面高温性能研究[J]. 中外公路, 2020, 40(4): 68-72.
- LU Yong, LIU Ai-hua, ZHANG Wen-hao, et al. Study on high temperature performance of asphalt pavement of existing expressway based on Hamburg rut test[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(4): 68-72.
- [9] 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.
- LIU Zhi-fei, DING Min. Research on HWTD of mixture on asphalt pavement after long term service[J]. Highway Engineering, 2018, 43(3): 225-228.
- [10] 孔德胜. 沥青混合料高温性能评价研究[J]. 公路与汽运, 2016(6): 104-107.
- KONG De-sheng. Research on evaluation of high temperature performance of asphalt[J]. Highways & Automotive Applications, 2016(6): 104-107.
- [11] 刘黎萍,张晓英. 沥青高温性能指标和混合料贯入强度相关性分析[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(3): 1-6.
- LIU Li-ping, ZHANG Xiao-ying. The correlation between the high temperature indicators of the asphalt and shearing properties of the mixture[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(3): 1-6.
- [12] 王虎,张化涛. 沥青混合料在重复荷载作用下的黏弹性变形[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2019, 16(1): 17-21.
- WANG Hu, ZHANG Hua-tao. Viscoelasticity study of asphalt mixture deformation under repeated loading[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2019, 16(1): 17-21.
- [13] 杨洋,李玉鑫,张争奇,等. 沥青混合料 SPT 简单性能试验及参数评价[J]. 中外公路, 2013, 33(1): 262-268.
- YANG Yang, LI Yu-xin, ZHANG Zheng-qi, et al. Asphalt mixture SPT simple performance test and parameter evaluation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(1): 262-268.
- [14] 张争奇,罗要飞,栗培龙,等. 基于重复加载蠕变试验的沥青混合料高温性能研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(4): 58-64.
- ZHANG Zheng-qi, LUO Yao-fei, LI Pei-long, et al. Study on the high-temperature performance of asphalt mixture based on repeated load creep test[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(4): 58-64.
- [15] Apeagyei A K. Flow number predictive models from volumetric and binder properties[J]. Construction and Building Materials, 2014, 64(15): 240-245.
- [16] Al-Khateeb G G, Al-Suleiman O T, Khedaywi T S, et al. Studying rutting performance of superpave asphalt mixtures using unconfined dynamic creep and simple performance test[J]. Road Materials and Pavement Design, 2018, 19(2): 315-333.
- [17] 钟远帆. 沥青混合料高温稳定性试验评价方法对比研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2016: 13-19.
- ZHONG Yuan-fan. Comparative research on test and evaluation methods of high temperature stability for asphalt mixture[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016: 13-19.
- [18] 刘安辉. 基于 SPT 试验的 RIOHTrack 沥青混合料高温性能评价研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018: 18-23.
- LIU An-hui. Evaluation research on high temperature performance for asphalt mixture of RIOHTrack based on SPT[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018: 18-23.
- [19] 查旭东,罗涛,刘安辉,等. 基于 SPT 试验的 RIOHTrack 上面层沥青混合料高温性能评价[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2020, 17(2): 18-25.
- ZHA Xu-dong, LUO Tao, LIU An-hui, et al. Evaluation of high temperature performance for upper surface layer asphalt mixture in RIOHTrack based on SPT[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology: Natural Science, 2020, 17(2): 18-25.