

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.015

引用格式:杨秋娥,陈高飞,谢军.规范车辙与汉堡车辙试验对比研究[J].公路与汽运,2025,41(2):69-73.

Citation: YANG Qiu'e, CHEN Gaofei, XIE Jun. Comparative study between standard rutting experiment and Hamburg rutting experiment[J]. Highways & Automotive Applications, 2025, 41(2): 69-73.

## 规范车辙与汉堡车辙试验对比研究<sup>\*</sup>

杨秋娥<sup>1</sup>, 陈高飞<sup>2</sup>, 谢军<sup>2</sup>

(1.湖南省醴陵高速公路建设开发有限公司, 湖南 湘潭 411200; 2.长沙理工大学 交通学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 沥青路面车辙病害的产生与沥青混合料高温稳定性密切相关。文中选用 2 种沥青混合料, 考虑不同试件厚度、温度条件等分别进行规范车辙试验和汉堡车辙试验, 对比分析 2 种试验方法在评价沥青混合料高温稳定性方面的差异。结果表明, 沥青层厚度增加不代表其车辙破坏更严重; 温度越高, 车辙变形越严重, SBS 改性沥青混合料的高温性能明显优于普通沥青混合料; 汉堡车辙试验中水浴条件比空气浴条件更严酷, 汉堡车辙试验的标准和条件比规范车辙试验更苛刻; 2 种车辙试验的试验结果存在较好的相关性, 汉堡车辙试验可作为规范车辙试验的有效补充。

**关键词:** 公路; 规范车辙试验; 汉堡车辙试验; 沥青混合料; 高温稳定性

**中图分类号:** U418.6

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2025)02-0069-05

车辙是沥青路面的典型病害形式之一。随着交通量的增加和车辆轴载的增大, 沥青层反复受到水平荷载和垂直荷载的共同作用, 如超过沥青混合料自身抗剪强度承受范围, 则容易造成拥包、推移及车辙等变形类破坏。同时, 沥青混合料是一种温度敏感性强的材料, 随着路面温度的升高, 沥青混合料的抗剪切性能逐渐降低, 在行车荷载反复作用下, 轮迹带逐渐变形凹陷, 两侧逐渐隆起, 形成车辙变形破坏。车辙不仅影响行车舒适性, 在下雨时辙槽积水, 还会严重威胁行车安全。Sousa J. B. 等认为沥青路面永久变形由压实变形和剪切变形组成, 其中剪切变形是沥青路面永久变形产生的主要原因, 提高沥青混合料的剪切性能是防治车辙破坏的关键<sup>[1]</sup>。倪富健等认为沥青面层较大的剪应力是导致其变形破坏的主要原因, 重载、高温和低速的组合会加速车辙变形的发生<sup>[2]</sup>。

沥青路面车辙的产生与沥青混合料的抗剪切变形能力密切相关, 高温条件下沥青混合料的抗变形性能尤为重要。目前评价沥青混合料高温稳定性的试验方法主要有马歇尔试验、三轴蠕变试验<sup>[3]</sup>、轮辙试验<sup>[4]</sup>、简单剪切试验<sup>[5]</sup>、单轴贯入试验<sup>[6]</sup>等, 其中轮辙试验模拟实际车轮荷载在试件或路面上行走, 试件或路面在车轮重复荷载作用下产生压密、剪切、

推移和流动, 从而产生车辙, 该方法是评价沥青混合料在规定温度条件下抵抗塑性流动变形能力的有效方法。中国规范采用的车辙试验<sup>[7]</sup> (以下简称规范车辙试验) 属于轮辙试验的一种。另外, 20 世纪 70 年代德国提出汉堡车辙试验<sup>[8-9]</sup>, 采用钢轮在沥青混合料试件上往复行走来模拟行车荷载作用, 也属于轮辙试验范畴, 该方法在欧美国家应用较广泛。本文从规范车辙试验和汉堡车辙试验的试验方法及试验条件、试验结果等方面对比分析其在评价沥青混合料高温稳定性方面的差异及产生原因, 为沥青混合料高温稳定性评价方法选择提供参考。

### 1 试验方法

#### 1.1 规范车辙试验

规范车辙试验可通过改变加载速率、试件类型、温度、荷载和试件厚度来研究沥青混合料在多种因素作用下的高温变形性能<sup>[10-12]</sup>, 具有试件成型方便、试验操作时间短、设备成本低等优点。

##### 1.1.1 试验条件

规范车辙试验温度可设定为 45 °C、60 °C、70 °C, 一般采用 60 °C 作为试验温度。

加载轮直径为 200 mm、宽度为 50 mm, 橡胶轮层厚度为 15 mm, 轮载荷载为 764.5 N, 压强为 (0.7 ±

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51978083)

0.5) MPa,以模拟标准轴载作用。试验过程中试验轮的行走距离为 $(230 \pm 10)$  mm,加载速率为 $(42 \pm 1)$  次/min,试验时长为 60 min。

试验采用板状试件,尺寸为 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times (50 \sim 100)$  mm,采用轮碾压实法成型。

### 1.1.2 评价指标

规范车辙试验的主要评价指标为加载 60 min 时的车辙深度及动稳定度,将动稳定度作为评价沥青混合料高温性能的指标。车辙深度反映试件在荷载作用下的最大变形,指在规定试验时间(60 min)内产生的总变形量,包含荷载作用下沥青混合料的压实变形和流动变形。动稳定度  $D_{DS}$  计算公式为:

$$D_{DS} = \frac{(t_2 - t_1)N}{d_2 - d_1} C_1 C_2 \quad (1)$$

式中: $t_1$ 、 $t_2$  为加载时间, $t_1 = 45$  min, $t_2 = 60$  min; $N$  为加载速度 42 次/min; $d_1$  为对应  $t_1$  的变形量; $d_2$  为对应  $t_2$  的变形量; $C_1$  和  $C_2$  为系数。

根据 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》,在不同气候分区,普通沥青混合料、改性沥青混合料和 SMA 沥青混合料须分别满足最小动稳定度的要求,否则应重新进行沥青混合料配合比设计,直到满足动稳定度要求为止<sup>[13]</sup>。

## 1.2 汉堡车辙试验

汉堡车辙试验操作简便,能较好地模拟实际工程中沥青路面所遭受的最不利外界条件,被认为是研究沥青混合料高温稳定性最严格的试验方法<sup>[14-16]</sup>。试验中试件依次经过后压密、蠕变、剥落 3 个阶段<sup>[17-18]</sup>(见图 1)。其中:后压密阶段通常定义为前 1 000 次加载作用阶段;蠕变阶段由曲线的第一个稳态部分表示,此时试件表现出车辙深度的相对恒定增大;剥落阶段用曲线的第二个稳态部分表示,其斜率比蠕变阶段大。

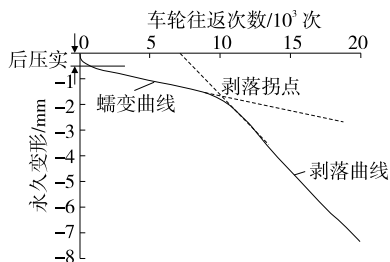


图 1 汉堡车辙试验车辙深度变化示意图

### 1.2.1 试验条件

汉堡车辙试验温度为  $25 \sim 70$  °C,一般采用  $45$  °C 或  $50$  °C。

加载轮采用 2 个钢轮,直径为 203.2 mm,宽度为 47 mm;轮载荷载为 $(705 \pm 4.5)$  N;钢轮移动速度约 340 mm/s;加载速率为 $(52 \pm 2)$  次/min。

试件可采用圆柱体试件或板式试件。采用圆柱体试件时,直径为 150 mm;采用板式试件时,尺寸为 $260 \text{ mm} \times 320 \text{ mm} \times (40 \sim 120)$  mm。试件可采用轮碾压实成型或旋转压实成型。

与规范车辙试验不同的是,汉堡车辙试验还能对试件泡水以完成浸水车辙试验。

### 1.2.2 评价指标

汉堡车辙试验评价标准参考美国 AASHTO 的研究成果<sup>[19]</sup>,试件车辙深度达到 20 mm 或荷载作用次数达到 20 000 次时试验结束。评价指标包括车辙深度、蠕变斜率、车辙阻力指数、剥落斜率、剥落拐点等。车辙深度以特定作用次数(5 000 次、10 000 次、15 000 次、20 000 次)下车辙深度表示,车辙深度越大,高温抗车辙性能越差。蠕变斜率为车辙深度曲线的第一个稳态部分(即蠕变阶段)的斜率,车辙深度与作用次数的关系通过曲线回归得到:

$$H = a + bN \quad (2)$$

式中: $H$  为车辙深度(mm); $N$  为加载次数; $b$  为蠕变斜率(mm/次)。

也可采用车辙深度和加载次数 2 个指标表征的蠕变速率进行评价。由于蠕变斜率的结果较小,可用蠕变斜率的倒数来确定蠕变速率,数值越大,每毫米车辙产生所需的轮载次数越大,混合料的高温抗变形性能越强。

剥落斜率和剥落拐点常用于浸水车辙试验结果评价。

## 2 沥青混合料试件制备

采用 AC-13、SMA-13 沥青混合料进行试验,沥青分别采用 70# 普通石油沥青和 SBS 改性沥青,集料均采用石灰岩集料。2 种沥青混合料的级配见图 2、图 3。

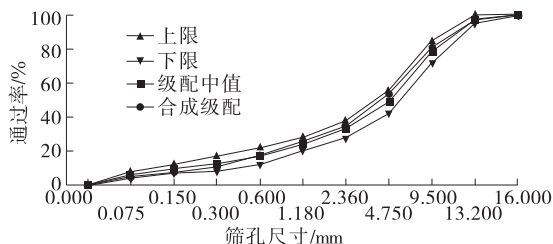


图 2 AC-13 沥青混合料的级配曲线

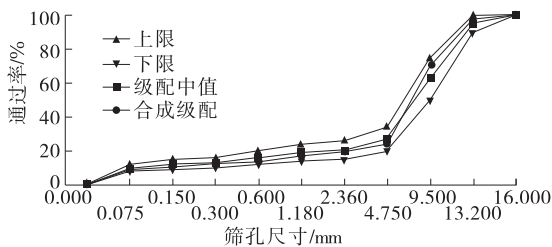


图 3 SMA-13 沥青混合料的级配曲线

按照规范要求进行马歇尔试验,确定 AC-13 的最佳油石比为 5.0%,SMA-13 的最佳油石比为 6.3%。

采用轮碾压实成型方法制作规范车辙试验试件,为 300 mm×300 mm×60 mm 板式试件;采用旋转压实成型方法制作汉堡车辙试验试件,为 150 mm×60 mm 圆柱体试件。同时,为便于比较,分别制作厚度 100 mm 的板式试件、厚度 100 mm 的圆柱体试件。每次试验采用 3 个试件进行平行试验。

3 试验结果与分析

3.1 不同试件厚度时试验结果

对 AC-13 沥青混合料采用 60 mm、100 mm 厚度试件分别进行规范车辙试验和汉堡车辙试验,试验温度为 60 ℃,结果见表 1、表 2。

表 1 不同试件厚度时规范车辙试验结果

| 试件厚度/mm | 动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) | 60 min 车辙深度/mm | 相对变形率/% |
|---------|----------------------------|----------------|---------|
| 60      | 1 236                      | 1.12           | 1.87    |
| 100     | 1 090                      | 1.35           | 1.35    |

表 2 不同试件厚度时汉堡车辙试验结果

| 试件厚度/mm | 车辙深度/mm | 相对变形率/% | 蠕变斜率/%   |
|---------|---------|---------|----------|
| 60      | >20.00  | >33.00  | -0.000 8 |
| 100     | 5.60    | 5.60    | -0.000 3 |

从表 1 可以看出:试件厚度从 60 mm 增大至 100 mm 时,尽管总的车辙变形值增大,但试件的相对变形率有所减小。从表 2 可以看出:试件厚度为 60 mm 时,其变形深度超过 20 mm,试验未达到 20 000 次即结束,其相对变形率较大;试件厚度为 100 mm 时,变形深度仅为 5.60 mm,其蠕变斜率更

小。说明厚度较大的沥青层对抵抗车辙变形有一定的作用,沥青层厚度增加不代表其车辙破坏更严重,也说明不能仅以车辙深度指标评价沥青混合料的高温稳定性。

3.2 不同温度时试验结果

为分析温度的影响,选取 AC-13(70# 普通沥青)和 AC-13(SBS 改性沥青)在 50 ℃、55 ℃、60 ℃下进行 2 种车辙试验。规范车辙试验结果见表 3;汉堡车辙试验结果见图 4~7,温度为 50 ℃和 55 ℃时采用水浴条件,温度为 60 ℃时分别采用水浴条件和空气浴条件。

表 3 不同温度时规范车辙试验结果

| 混合料类型           | 不同温度(℃)下动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> ) |       |       |
|-----------------|------------------------------------|-------|-------|
|                 | 50                                 | 55    | 60    |
| AC-13(70# 普通沥青) | 1 925                              | 1 718 | 1 530 |
| AC-13(SBS 改性沥青) | 9 650                              | 8 695 | 2 780 |

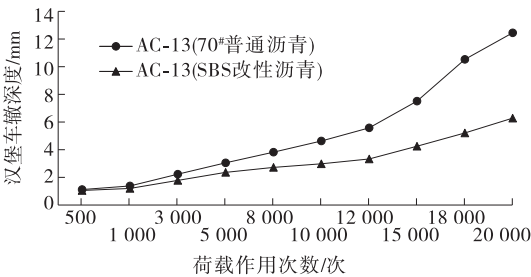


图 4 50 ℃水浴条件下汉堡车辙试验结果

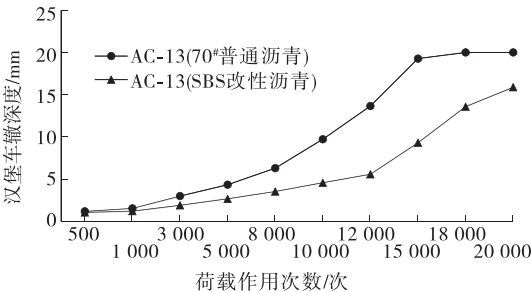


图 5 55 ℃水浴条件下汉堡车辙试验结果

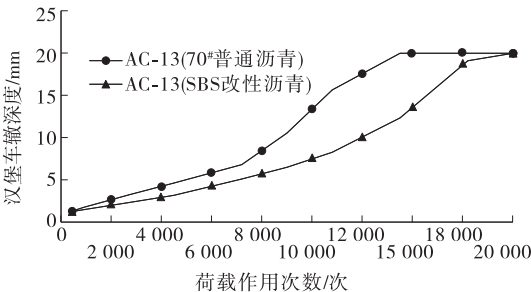


图 6 60 ℃水浴条件下汉堡车辙试验结果

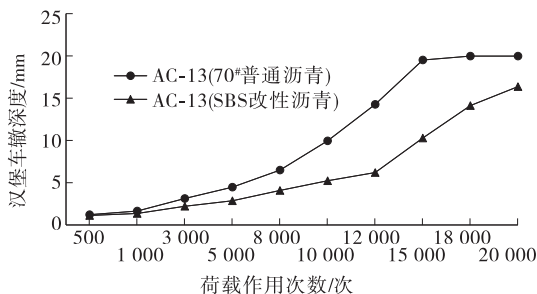


图 7 60 °C 空气浴条件下汉堡车辙试验结果

由表 3 可知:对于规范车辙试验,随温度升高,动稳定度逐渐下降,且温度越高,动稳定度下降幅度越明显;SBS 改性沥青混合料的高温性能明显优于普通沥青混合料。

由图 4~7 可知:1) 相同温度条件下,随荷载作用次数增加,车辙变形逐渐增大,SBS 改性沥青混合料的车辙变形明显小于普通沥青混合料。2) 相同水浴恒温条件下,随温度升高,车辙变形逐渐增大,以 AC-13(SBS 改性沥青)为例,50 °C 时变形值为 6.28 mm,55 °C 时增大至 15.89 mm,60 °C 时变形值为 20.00 mm,说明温度对车辙变形具有显著影响。3) 温度为 60 °C 时,水浴和空气浴条件下车辙变形不同,如水浴条件下 AC-13(SBS 改性沥青)的变形值为 20.00 mm,而空气浴条件下变形值为 17.32 mm,说明水浴条件比空气浴条件更严酷。4) 以 AC-13(70# 普通沥青)为例,在 55 °C 水浴、60 °C 水浴和 60 °C 空气浴条件下,作用次数未达到 20 000 次前,其车辙变形值已达到 20.00 mm,说明其不满足标准要求。而表 3 中 3 种温度条件下规范车辙试验结果均满足规范要求。说明两种试验方法存在差异,相比规范车辙试验,汉堡车辙试验的标准更苛刻。

### 3.3 相关性分析

对 AC-13、SMA-13 沥青混合料分别进行规范车辙试验和汉堡车辙试验,试验条件均为 60 °C、0.7 MPa,规范车辙试验采用 300 mm×300 mm×60 mm 板式试件,汉堡车辙试验采用 150 mm×60 mm 圆柱体试件。结果见图 8、图 9,为便于比较,只列出与规范车辙作用次数相同的试验结果。由图 8、图 9 可知:车辙深度与荷载作用次数存在较好的相关性;改性沥青混合料和普通沥青混合料的规范车辙深度和汉堡车辙深度存在差异,相同环境和加载次数下,汉堡车辙深度明显低于规范车辙深度。

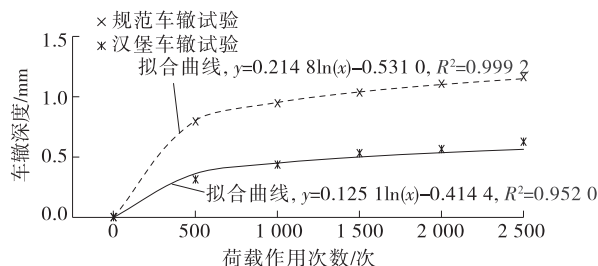


图 8 SMA-13 沥青混合料车辙试验结果

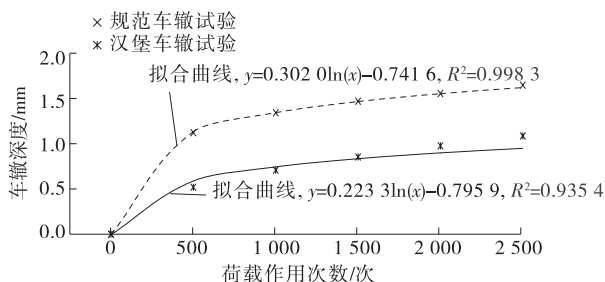


图 9 AC-13 沥青混合料车辙试验结果

对 AC-13 和 SMA-13 沥青混合料的 2 种车辙试验结果进行统计,结果见图 10。由图 10 可知:2 种车辙试验的试验结果存在较好的相关性,汉堡车辙试验可作为规范车辙试验的有效补充。

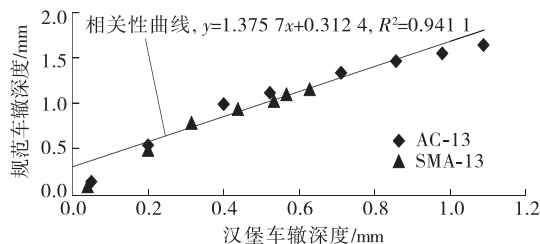


图 10 汉堡车辙与规范车辙试验的相关性

## 4 结论

(1) 厚度较大的试件对抵抗车辙变形有一定的作用,沥青层厚度增加不代表其车辙破坏更严重。

(2) 温度越高,车辙变形越严重;SBS 改性沥青混合料的高温性能明显优于普通沥青混合料。

(3) 同等条件下,水浴条件下汉堡车辙试验得到的车辙深度明显大于空气浴条件下车辙深度,说明试件经历的水浴条件比空气浴条件更严酷。满足规范车辙试验标准的试件并不能满足汉堡车辙试验的标准,汉堡车辙试验的标准和条件更苛刻。

(4) 相同环境和加载次数下,汉堡车辙深度明显低于规范车辙深度。2 种车辙试验的试验结果存在较好的相关性。

(5) 规范车辙试验的测试时间较短,试件成型

方便,但存在测试时间过短难以模拟车辙变形流动发展阶段的不足,计算动稳定度时由于2个时刻变形量过于接近,难以准确反映车辙变形发展趋势。而汉堡车辙试验基本反映了试件的全过程变形情况,可真实反映车辙变形的发展趋势。汉堡车辙试验可作为规范车辙试验的有效补充。

#### 参考文献:

- [1] SOUSA J B, CRAUS J, MONISMITH C L. Summary report on permanent deformation in asphalt concrete[R]. SHRP-A/IR-91-104, National Research Council, 1991.
- [2] 倪富健,王燕芳,马翔.城市道路交叉口沥青路面受力分析[J].公路交通科技,2010,27(7):41-45.
- [3] 黄伟,郝朝.基于单轴静载蠕变试验的AC-13高温性能影响研究[J].公路与汽运,2022(6):75-78+94.
- [4] SUSANTO H A, YANG S H, KAO C T, et al. Effect of viscoelastic material in hot mix asphalt rutting performance correlation using different wheel-tracking test[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2022, 15(3): 693-705.
- [5] American Association of State Highway and Transportation Officials. Standard test method for determining the permanent shear stain and stiffness of asphalt mixtures using the superpave shear tester[S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011.
- [6] 毕玉峰,孙立军.沥青混合料抗剪试验方法研究[J].同济大学学报(自然科学版),2005,33(8):1036-1040.
- [7] 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.
- [8] American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO T324, Standard test method for humberg wheel-track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA) [S]. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2014.
- [9] WALUBITA L F, FARUKA N M, ZHANG J, et al. The Hamburg rutting test: Effects of HMA sample sitting time and test temperature variation[J]. Construction and Building Materials, 2016, 108: 22-28.
- [10] 匡姣姣.沥青混合料抗车辙性能指标相关性研究[D].长沙:长沙理工大学,2015.
- [11] 杨小宾.沥青抗车辙性能评价指标研究[J].山东交通科技,2023(3):32-35+47.
- [12] 杨艳华.甘肃省夏热冬寒区车辙试验方案设计研究[J].公路与汽运,2016(3):103-105.
- [13] 中交路桥技术有限公司.公路沥青路面设计规范:JTG D50—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [14] 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.
- [15] 夏雨,普布扎西,邵华,等.基于汉堡车辙试验的沥青混合料性能诊断性分析与评价[J].山东交通学院学报,2024,32(4):73-79.
- [16] 王鑫洋,高国华,汲平,等.基于汉堡车辙试验铁尾矿沥青混合料耐久性研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2023,47(5):938-941.
- [17] HASAN M M, TAREFDER R A. Development of rutting specifications and possible replacement of tensile strength ratio by Hamburg wheel tracking device test[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2020, 13(4): 376-382.
- [18] ZHANG W G, CHEN X, SHEN S H, et al. Investigation of field rut depth of asphalt pavements using Hamburg wheel tracking test[J]. Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 2021, 147(1): 04020091.
- [19] TSAI B W, COLERI E, HARVEY J T, et al. Evaluation of AASHTO T324 Hamburg-wheel track device test[J]. Construction and Building Materials, 2016, 114: 248-260.

收稿日期:2024-02-24