

# 高温-雨水耦合作用下排水沥青混合料 抗水破坏性能试验研究



杨晚生<sup>1</sup>, 刘群艳<sup>2</sup>, 甘新众<sup>2</sup>, 李闯民<sup>3,4,\*</sup>

<sup>1</sup>江西宜春市政交通建设有限公司, 江西宜春 336000

<sup>2</sup>江西省宜春市公路事业发展中心, 江西宜春 336000

<sup>3</sup>长沙理工大学交通运输工程学院, 湖南长沙 410114

<sup>4</sup>道路结构与材料交通行业重点实验室 (长沙), 湖南长沙 410114

**摘要:** 随着绿色道路的发展, 排水沥青路面在中国逐步出现和广泛应用。为探讨排水沥青混合料在高温雨水耦合条件下的抗水破坏性能衰减程度, 本文采用了汉堡车辙试验, 对排水沥青混合料试件在温度 60 ℃ 和 50 ℃ 的干燥、饱水和浸水条件组合为工况 1 (50 ℃, 干燥), 工况 2 (50 ℃, 饱水), 工况 3 (50 ℃, 浸水), 工况 4 (60 ℃, 干燥), 工况 5 (60 ℃, 饱水), 工况 6 (60 ℃, 浸水) 等 6 种环境工况进行试验, 通过测量车辙深度值、计算车辙变形率、蠕变速率和剥落变形拐点值等指标, 评估了排水沥青混合料在不同环境工况下的抗水破坏性能。试验结果表明, 在高温-雨水耦合条件下, 排水沥青混合料的车辙深度值、车辙变形率、蠕变速率和剥落变形拐点值等指标均有不同程度的下降, 说明高温和雨水的耦合作用会大幅度降低排水沥青混合料的抗水破坏性能。60 ℃ 干燥、饱水、浸水条件下的最大车辙深度值分别是同 50 ℃ 干燥、饱水、浸水条件下车辙深度的比值为 1.95、2.54、2.60 倍; 50 ℃ 干燥、50 ℃ 饱水、50 ℃ 浸水、60 ℃ 干燥、60 ℃ 饱水、60 ℃ 浸水条件车辙深度比值为 1:1.2:2.2:1.9:3.1:5.8; 车辙变形率比为 1:1.2:2.2:1.9:3.1:7.2; 蠕变速率为 2.4:2.2:1.2:1.3:1.1:1; 剥落变形拐点值比值为 2.5:2.25:1.25:1.75:1.25:1。本研究表明高温和雨水的耦合作用对排水沥青混合料的抗水破坏性能有显著影响。本文的研究成果已经通过汉堡车辙试验验证, 为绿色道路的发展和应用提供了理论依据和技术支持。

**关键词:** 路面工程; 抗水破坏; 排水沥青混合料; 高温-雨水环境; 汉堡车辙试验

**DOI:** [10.57237/j.mater.2023.05.001](https://doi.org/10.57237/j.mater.2023.05.001)

## Experimental Study on Water Damage Resistance of Permeable Asphalt Mixture Under Coupling Action of High Temperature and Rainwater

Yang Wansheng<sup>1</sup>, Liu Qunyan<sup>2</sup>, Gan Xinzong<sup>2</sup>, Li Chuangmin<sup>3,4,\*</sup>

<sup>1</sup>Jiangxi Yichun Municipal Transportation Construction Co., Ltd., Yichun 336000, China

<sup>2</sup>Highway Development Center of Yichun City, Yichun 336000, China

<sup>3</sup>School of Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目, 特重蠕行荷载路段高抗车辙柔性沥青路面成套技术研究 (项目编号 2021H0019).

\*通信作者: 李闯民, lichuangmin@126.com

收稿日期: 2023-08-17; 接受日期: 2023-09-14; 在线出版日期: 2023-09-19

<http://www.materialsrd.com>

<sup>4</sup>Key Laboratory of Road Structure and Material Transportation Industry (Changsha), Changsha 410114, China

**Abstract:** Permeable asphalt road surfaces have gained prominence in China's green road initiatives, finding widespread application. To investigate the extent of water-induced deterioration of permeable asphalt mixtures under high-temperature rainfall coupled conditions, this study employed Hamburg Wheel Tracking (HWT) tests. Six environmental conditions were established, encompassing dry, saturated, and submerged states at temperatures of 50 °C and 60 °C, denoted as Conditions 1 (50 °C, dry), 2 (50 °C, saturated), 3 (50 °C, submerged), 4 (60 °C, dry), 5 (60 °C, saturated), and 6 (60 °C, submerged). Various performance indicators, including rut depth, rut deformation rate, creep rate, and stripping inflection point, were measured to evaluate the water damage resistance of permeable asphalt mixtures under different environmental conditions. The results revealed a significant decrease in all assessed indicators under high-temperature rainfall coupled conditions, suggesting a substantial reduction in water damage resistance. Notably, under dry, saturated, and submerged conditions at 60 °C, the maximum rut depths were 1.95, 2.54, and 2.60 times those observed at 50 °C, respectively. The rut depths exhibited a ratio of 1:1.2:2.2:1.9:3.1:5.8 for the conditions of 50 °C dry, 50 °C saturated, 50 °C submerged, 60 °C dry, 60 °C saturated, and 60 °C submerged. The rut deformation rate ratios followed a pattern of 1:1.2:2.2:1.9:3.1:7.2, while the creep rate ratios were 2.4:2.2:1.2:1.3:1.1:1, and the stripping inflection point ratios were 2.5:2.25:1.25:1.75:1.25:1 for the same conditions. This study underscores the significant influence of high-temperature rainfall coupling on the water damage resistance of permeable asphalt mixtures. The research outcomes, validated through Hamburg Wheel Tracking tests, provide theoretical foundations and technical support for the development and application of green road systems.

**Keywords:** Road Engineering; Water Damage Resistance; Permeable Asphalt Mixture; High Temperature Rainwater Environment; Hamburg Rutting Test

## 1 绪论

排水沥青路面是一个大孔隙沥青混凝土结构，它通过连通内部孔隙能够实现对面表水的快速下渗和横向排出，所以，对于公路、城市等道路路面表水膜厚度过大或排水不通畅的路面，设置排水路面已成为改善行人安全和舒适度的可行方式[1]。相比传统沥青路面，排水路面的主要优势在于能提高路面抗滑性能、降低路面噪音、减轻城市水压力等，但其劣势也比较明显，主要有承载力较低、容易堵塞，水温条件下极易出现松散、剥落、车辙等病害。大多数研究者从集料与沥青的粘附性入手，试图提高结合料的黏度以提高沥青混合料的抗水损害、抗车辙等病害的能力，并取得了显著的成效[2-4]；也有研究者从集料、添加剂、级配、空隙率等角度出发研究排水沥青路面的高温性能、低温性能、水稳定性及排水性能，也取得了一定的成效[5-7]。常规的路用性能试验，并不能反映排水沥青混合料的使用性能条件，尤其是排水路面在实际使用中的高温-雨水耦合作用的状况。高温和雨水的耦合作用是排水沥青路面区别于密级配沥青混合料所处的严酷的工作条件。由于车轮荷载，内部半连通孔隙水将对沥青混合料产生动水压力。

在短期浸泡和长期雨水冲刷作用下，沥青与集料的粘附力降低。此外，加上车轮荷载的影响，路面的空隙率将降低，骨料颗粒将重新排列，这将极大地影响排水沥青路面的稳定性，因此容易发生剥落、松散和车辙病害。国内外研究水温条件下沥青混合料综合性能的试验仪器主要有美国的沥青路面分析仪（APA）和德国的汉堡车辙仪（HWT），相关研究表明[8, 9]，两者均很好的模拟了实际路面受水温综合作用的影响效果，其试验结果可表征路面车辙变形和水破坏的全过程，与实际环境较为贴切。本文在调研国内外排水沥青混合料水破坏试验和评价指标的基础上，针对排水路面的实际工作状况，模拟干燥（气浴）、饱水和浸水排水混合料的三种工况，设定试验温度 50 °C 和 60 °C，设计高温-雨水耦合作用下的汉堡车辙正交试验方案，采用最大车辙深度、车辙变形率评价抗车辙性能，剥落变形拐点值、蠕变速率评价抗水破坏性能。试验得出了高温-雨水耦合作用下，排水沥青混合料抗水破坏衰减规律。研究成果对中国大空隙沥青混合料水破坏评价试验的条件设置和评价指标的提出有参考价值。

## 2 汉堡车辙评价指标及试验设计方案

### 2.1 汉堡车辙评价指标

汉堡车辙试验机可用于研究沥青混合料在多种因素影响下的性能，特别是水的影响。它可以在干燥、饱水、浸没条件下进行测试，很好地模拟了实际条件下的道路条件[10, 11]。对于排水性沥青混合料，由于空隙率较大，一部分雨水可沿连通间隙流入下层或横向排出，而另一部分雨水将通过半连接空隙留在结构内部。在实际环境中，结构内的水可能高温下缓慢蒸发，或者可能由于车轮荷载下产生水动力压力而损坏道路结构。汉堡车辙试验机可通过控制温度和水环境来模拟道路车辙，试验结果可作为检查配合比设计和预测道路寿命的参考

汉堡车辙试验机采用宽度为 47mm 的钢轮，轮速为 52 次/min、轮压 0.7MPa。参考了 AASHTO T324 的研究成果，采用的评估方法是，当碾压次数达到 20000 次或车辙深度达到 20mm 时，每组试样结束试验，通常持续时间为 6.5 小时[11]。测试仪器如图 1 所示。



图 1 汉堡车辙试验

通过查阅相关文献[12-14]，欧美研究机构的评价指标及技术要求如表 1 所示。

表 1 沥青混合料汉堡车辙试验指标和技术要求

混合料类型	技术要求	备注	
试件空隙率为 7% 左右	沥青高温等级≥PG76	最大车辙深度 12.5mm (碾压次数 20000)	50℃ 水浴，德克萨斯州汉堡车辙试验要求[12] (2006 年提出)
	沥青高温等级≥PG76	最大车辙深度 10mm (碾压次数 20000)	任何温度水浴，科罗拉多州地方规范[12]
	中面层	最大车辙深度 3.5mm (碾压次数 20000)	50℃ 水浴，德国[13]
多孔沥青混合料 (PFC)	最大车辙深度 12.5mm (碾压次数 10000)	50℃ 水浴，Donald Watson 等人参考德克萨斯州提出的 PFC 混合料的汉堡车辙试验要求[14] (2018)	

备注：饱水条件下的汉堡车辙技术指标暂无相关规范及文献借鉴。

目前，在汉堡车辙试验中，排水沥青混合料的评价指标还没有统一的标准。通过归纳总结，汉堡车辙试验指标主要包括最大车辙深度对应的荷载次数、变形斜率（蠕变斜率、剥离斜率）、变形率（相对变形率、车辙变形率）和剥离变形拐点[10-13]。

### 2.2 汉堡车辙试验设计方案

当气温高于 30℃ 时，沥青路面的温度通常在 50℃ 以上，在行车荷载作用下路面会发生车辙。考虑到南方高温多雨的天气条件，夏季路面内部温度有时高达 60℃ 以上[15]。因此，参考国外汉堡车辙试验温度（通常为 50℃），结合中国大部分气候条件，汉堡车辙测试的试验温度为 50℃ 和 60℃。

在国外，汉堡车辙试验大多在恒温水浴条件下进行[12-14]，在饱水条件下进行的试验研究很少。从理论分析可以看出，水浴条件相当于浸没状态，该条件仅在降雨量较大且无法及时排放时才满足。在设计排水设施的

排水沥青路面由于空隙率较大而处于浸没状态并不常见。因此，考虑到处于饱水状态的试件能够更好地模拟排水混合料在降雨和实际荷载作用下的实际情况，因此本设计采用干燥（气浴）、饱水和浸水三种工况进行试验。采用真空饱水马歇尔试件的试验方法使试样饱水。采用高温-雨水耦合作用下的正交试验方案如表 2 所示。每组试件进行 2 次平行试验。组合的 6 种环境工况为：工况 1（50℃，干燥），工况 2（50℃，饱水），工况 3（50℃，浸水），工况 4（60℃，干燥），工况 5（60℃，饱水），工况 6（60℃，浸水）。工况 1, 2, 3 组同为 50℃ 条件，对应的雨水条件为干燥（无雨水）、饱水和浸水，工况 4, 5, 6 组同为 60℃ 条件，对应的雨水条件为干燥（无雨水）、饱水和浸水。

表 2 正交试验表

试验环境工况编号	温度/℃	雨水环境
工况 1	50	干燥
工况 2	50	饱水

试验环境工况编号	温度/℃	雨水环境
工况 3	50	浸水
工况 4	60	干燥
工况 5	60	饱水
工况 6	60	浸水

### 2.3 排水沥青混合料设计

本次试验选用 A 级 70# 基质沥青、中国产高抗飞散 HVA 高黏剂、配制掺量为 16% (占沥青质量) 的高黏剂改性沥青, PG 等级为 PG82-28, 粗集料为 10-15mm、

5-10mm 辉绿岩、细集料为石灰岩 0-5mm 机制砂、矿粉为磨细石灰岩、水泥为 P.O.32.5 普通硅酸盐水泥(代替一部分矿粉进行掺拌)、中国产木质素纤维。本文选择级配为 10~15mm: 5~10mm: 0~5mm: 水泥: 矿粉=58%: 30%: 9%: 2%: 1%。改性剂为 16% HVA 高黏剂(直投法)、油石比 5.2%、木质素纤维为混合料质量的 0.3%, 配制 PAC-13 排水沥青混合料, 其性能检测结果见表 3。

表 3 PAC-13 混合料性能检测结果

项目	空隙率 (%)	连通空隙率 (%)	稳定度 (kN)	流值 (mm)	动稳定度 (次/mm)	析漏损失 (%)	飞散损失 (%)	冻融劈裂比 (%)	渗水系数 (mL/15s)
实测值	20.5	14.5	7.61	3.24	4302	0.12	4.5	87.8	893
技术要求	18-25	≥14	≥5	2-4	≥3500	<0.3	<15	≥85	≥800

## 3 排水沥青混合料汉堡车辙试验结果分析

汉堡车辙试验可评价沥青混合料的抗车辙性能及抗水破坏性能, 本文主要通过汉堡车辙变形及变形曲线结果分析混合料的试验性能。评价抗车辙性能的主要指标有最大车辙深度、车辙变形率, 而评价抗水破坏性能的主要指标是蠕变速率、剥落变形拐点值。

### 3.1 汉堡车辙变形分析

由于采用带有拼接接缝方式的圆柱体试件, 在加载过程中不可避免地会发生局部位移和应力-应变值的突变。参考相关参考文献[16, 17], 在两次荷载(即一次循环)条件下, 对 11 个相位点的垂直位移进行相应计算。方法如下, 圆柱体试件的 11 个点布置如图 2 所示。

选择点 S3、S4、S8、S9 处的垂直位移, 计算一个加载循环的车辙深度, 并舍弃容易受试验边缘影响的

试件端点 S1、S2、S10、S11 和中心点 S5、S6、S7。当某一点的数值与各点位的平均值之间的差值大于标准偏差的 2 倍时, 该点值也被丢弃, 取其剩余点的平均值作为规定加载次数下的车辙深度值。随加载次数的增加车辙深度的变化如表 4 和图 3。

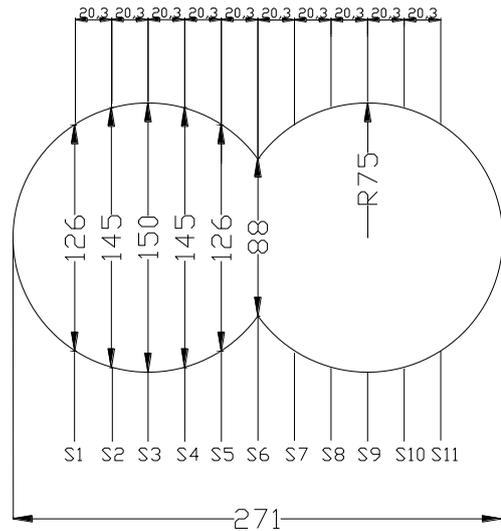


图 2 圆柱体试件点分布 (单位: mm)

表 4 不同加载次数下的车辙深度表 (单位: mm)

试验条件		加载次数									
		2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000
1	50℃ 干燥	0.62	1.06	1.46	1.80	2.13	2.41	2.68	2.95	3.21	3.47
2	50℃ 饱水	0.83	1.46	2.02	2.38	2.72	3.03	3.34	3.64	3.93	4.26
3	50℃ 浸水	1.19	2.03	2.76	3.44	3.95	4.56	5.19	5.74	6.42	7.69
4	60℃ 干燥	1.06	1.83	2.49	3.07	3.58	4.07	4.57	5.32	6.12	6.75
5	60℃ 饱水	1.53	2.85	3.74	4.48	5.03	5.69	6.36	7.05	8.44	10.82
6	60℃ 浸水	1.81	2.93	3.66	4.29	6.15	9.36	13.85	20	—	—

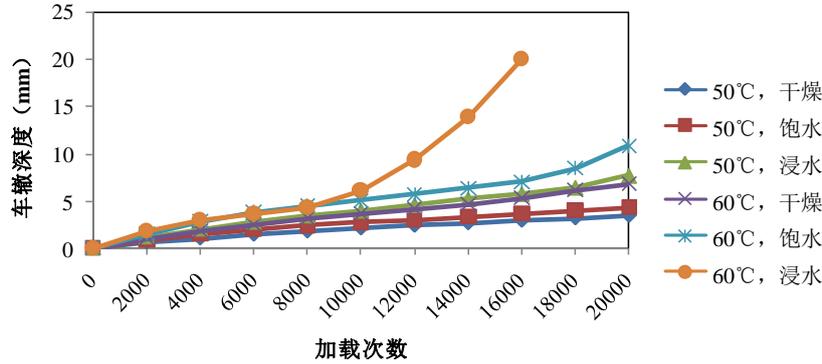


图3 车辙深度随加载次数增加的趋势变化图

由图3可知,随着加载次数的增加,试件产生的变形逐渐增大。相同温度下,试件的车辙深度排序为:浸水>饱水>干燥,说明水对车辙有很大影响;在相同雨水环境下,60℃试件的车辙深度>50℃的,说明高温也对车辙有影响。试验中发现,50℃浸水试验条件与60℃干燥条件下的试验结果相差较小,具有一定的可比性;60℃浸水条件下的车辙发展快速,在加载16000次时就发生破坏(最大车辙深度超过20mm),说明当高温-雨水耦合时,试件更容易产生车辙且变形更严重。

汉堡车辙试验的评价技术指标中,车辙变形率指标由式(1)和(2)计算。

$$r_{RD} = \frac{H}{t} \tag{1}$$

$$t = \frac{n}{N \times 60} \tag{2}$$

- 其中:  $r_{RD}$ —车辙变形率 (mm/h);
- H—最大车辙深度 (mm);
- t—加载时间 (h);
- n—达最大车辙深度时作用的加载次数;
- N—轮速 (52次/min)。

依据式(1)和(2)及图3试验数据,计算车辙变形率及车辙相对变形率如表5所示。

表5 车辙变形率结果

试验条件(工况)	H (mm)	n	车辙变形率 (mm/h)
1 50℃干燥	3.47	20000	0.54
2 50℃饱水	4.26	20000	0.66
3 50℃浸水	7.69	20000	1.20
4 60℃干燥	6.75	20000	1.05
5 60℃饱水	10.82	20000	1.69
6 60℃浸水	20.00	16000	3.90

如表5所示,50℃干燥,50℃饱水、50℃浸水、60℃干燥、60℃饱水、60℃浸水条件车辙深度比值为1:1.2:2.2:1.9:3.1:5.8。试样的最大车辙深度H工况组排序为6>5>3>4>2>1。第2组的最大车辙深度H为第1组的1.23倍,第3组为第2组1.81倍,表明水对车辙有负面影响。第4组、第5组和第6组的最大车辙深度H分别是第1组、第2组和第3组的1.95倍、2.54倍和2.60倍,这表明温度对车辙有更明显的影响。

第1-5组在20000次时均有最大车辙深度检测值,只有第6组在16000次时达到车辙深度已经达到极限值20mm。试验结果表明,在60℃浸水条件下,路面车辙发展迅速,变形最为严重。高温雨水耦合条件加速了道路车辙变形过程。

50℃干燥,50℃饱水、50℃浸水、60℃干燥、60℃饱水、60℃浸水车辙变形率比值为1:1.2:2.2:1.9:3.1:7.2。试件的车辙变形率由大到小排序为6>5>3>4>2>1,第2组为第1组的1.22倍,第3组为第2组的1.82倍,第4、5、6组分别为第1、2和3组的1.94、2.56和3.25倍。第1组至第5组车辙变形率的变化规律与最大车辙深度几乎相同,而第6组则明显不同。理论上,我们可以分析第6组的不同变化是受加载次数的影响。因为只有第6组在加载次数为16000时具有最大车辙深度。车辙变形率指标考虑了达到最大车辙厚度时的加载次数。此外,车辙变形率可用于横向比较不同条件下的试验规律,便于与其他指标建立联系。因此,本文采用车辙变形率指标作为汉堡车辙试验的评价指标。

由表4可知,当碾压次数分别为10000和20000时,第3组的车辙深度分别为3.95mm和7.69mm,同时满足表1中德克萨斯州、科罗拉多州对沥青PG等级大于76的汉堡车辙试验要求及PFC混合料的要求。

总之，温度和雨水都会影响道路车辙，在高温和雨水的耦合作用下，道路车辙发展更快。从“饱水和浸水”试验条件来看，在实际环境中，由于排水沥青路面空隙较大，雨水会沿路面结构流入下层或横向进入排水设施，很难造成浸水情况的发生。通常在道路使用数年后，排水沥青路面的缝隙被灰尘和其他碎屑堵塞，在高温和大雨条件下，道路的实际环境才符合汉堡车辙试验的浸水条件。实际上，饱水试验条件更符合实际道路所处环境状况。考虑到中国的城市气候并参考国外标准，对于排水沥青混合料，建议在 60℃ 饱水条件下进行汉堡车辙试验，并使用车辙深度作为评价指标。在本批试验中，60℃ 饱水条件下，当加载次数为 10000 次时，车辙深度为 5.03mm。当加载次数为 20000 次时，车辙变形率为 1.69mm/h。对于车辙变形率，国内外没有指标要求。今后需要对不同 PAC 混合料大量试验结果进行统计和分析，以获得适用于 PAC 混合料的车辙变形率技术要求。本文的试验结果可供参考。

### 3.2 抗剥落性能分析

本文采用不同区间段的蠕变速率（即小区间段内曲线变形率的倒数（单位：次/mm））变化规律来分析试件的抗剥落性能，蠕变速率开始突然下降前对应的加载次数为剥落变形拐点值，以  $n_1$  表示，其值越大，表明试件的抗剥落性能越好。

汉堡车辙试验的蠕变速率计算公式如式(3)（类似中国的动稳定度指标）：

$$DS = \frac{N_2 - N_1}{d_2 - d_1} \quad (3)$$

其中：DS—蠕变速率（次/mm）；

$d_1$ —加载次数为  $N_1$  时的车辙变形深度（mm）；

$d_2$ —加载次数为  $N_2$  时的车辙变形深度（mm）。

蠕变速率反映了车辙深度随加载次数变化的全过程，通过计算出每加载 2000 次数下对应的蠕变速率变化值和剥落变形拐点值  $n_1$ ，结果见表 6。

表 6 蠕变速率及剥落变形拐点 ( $n_1$ ) 结果

试验条件	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	20000	$n_1$
1 50℃ 干燥	3226	4545	5000	5882	6061	7143	7407	7407	7692	7692	—
2 50℃ 饱水	2410	3175	3571	5556	5882	6452	6452	6667	6897	6061	18000
3 50℃ 浸水	1681	2381	2740	2941	3922	3279	3175	3636	2941	1575	10000
4 60℃ 干燥	1887	2597	3030	3448	3922	4082	4000	2667	2500	3175	14000
5 60℃ 饱水	1307	1515	2247	2703	3636	3030	2985	2899	1439	840	10000
6 60℃ 浸水	1105	1786	2740	3175	1075	623	445	325	—	—	8000

如表 6 所示，蠕变速率随加载次数的增加而不稳定变化。第 1 组的最大蠕变速率为 7692 次/mm，第 2~6 组的最大蠕变速率分别为 6897 次/mm、3922 次/mm、4082 次/mm 和 3636 次/mm 以及 3175 次/mm。50℃ 干燥，50℃ 饱水、50℃ 浸水、60℃ 干燥、60℃ 饱水、60℃ 浸水条件蠕变速率比值为 2.4:2.2:1.2:1.3:1.1:1。蠕变速率随着水量和温度的增加而逐渐衰减。第 4 组的最大蠕变速率大于第 3 组，表明浸水条件可显著影响试样的抗剥离性能。第 3 组和第 5 组的最大蠕变速率相同，表明试样在 50℃ 浸水条件和 60℃ 饱水条件下的抗剥落性能相当。如图 4 所示，随着加载次数的增加，第 1 组的蠕变速率增加趋势逐渐缓慢，表明 50℃ 干燥条件下的试样抗剥落性能最好，无剥离现象。第 2 组在 50℃ 饱水条件下的试样抗剥落性能次之，当加载次数达到 18000 次时，试样开始剥落。组 3 至 6 的蠕变速率也逐渐增加，但当加载次数分别达到一定值时

（10000、14000、10000 和 8000），出现拐点  $n_1$ （表 6）。50℃ 干燥，50℃ 饱水、50℃ 浸水、60℃ 干燥、60℃ 饱水、60℃ 浸水条件，剥落变形拐点值比值为 2.5:2.25:1.25:1.75:1.25:1。在剥落变形拐点值后，大空隙沥青混合料处于不稳定状态下，抗剥落性能下降。综合 6 种工况的结果，抗剥离性能最好的是工况 1，其次是工况 2、4，工况 3、5 相当，工况 6 最差。

从前面的分析中可以看出，第 1 组至第 6 组的蠕变速率在开始时都处于增加阶段。从理论分析来看，由于大空隙沥青路面的空隙率较大，在车轮荷载的作用下，砂浆和骨料继续填充空隙，骨料滑动，颗粒排列更加紧密，试样不断压实，空隙率逐渐降低。然而，空隙率仍然可以使部分骨料和矿粉填充，因此蠕变速率继续增加，增长速率缓慢。当加载次数达到一定值时，蠕变速率增加得更快。例如，当组 2 和组 3 的加载次数分别为 6000 次和 8000 次时的结果。这可能是

由于空隙率降低,从而提高了试样的路用性能。第2~6组的蠕变速率随加载次数的增加而减小。从颗粒之间相互作用的角度来看,颗粒在沥青的作用下进一步沿接触面滑动,颗粒之间的相对位移增加,接触点减小,然后骨架不稳定导致试样松动,因此大空隙沥青混合

物的强度开始降低,即进入剥离阶段,蠕变速率开始下降。

为研究同一温度或同样水环境下的试件破坏情况,分别取50℃、60℃、干燥、饱水、浸水条件下的三组或两组试件作对比,如图4所示。

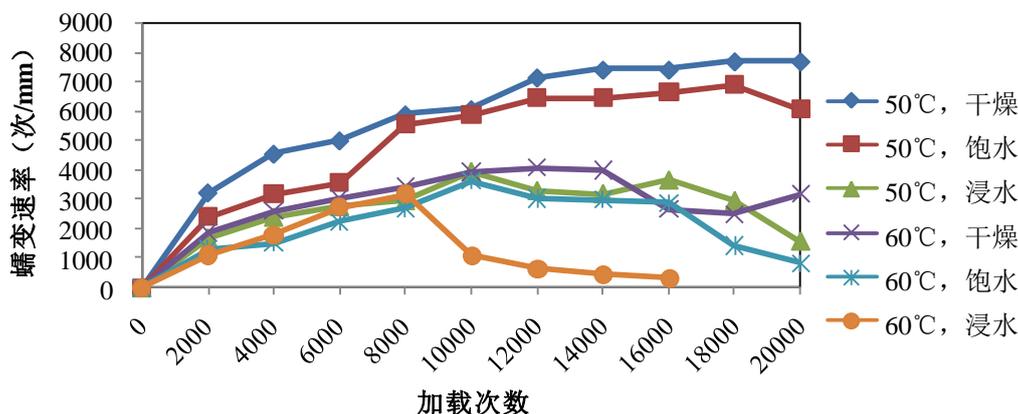


图4 不同条件下蠕变速率变化对比图

由图4可知,50℃条件下试件的蠕变速率干燥时最大,饱水时次之,浸水时最小,说明浸水条件下的试件更容易产生剥落,且试件在饱水状态时的蠕变速率可高达6897次/mm,试件抗剥落性较好,同时表明水对试件的影响较大,容易使沥青与集料脱落导致试件结构失稳而引起破坏;温度为60℃时,试件在干燥或水环境中均会产生剥落,试件在干燥状态时的蠕变速率最大,剥落拐点值最大,试件的抗剥落性能相对最好,试件在饱水和浸水状态时的蠕变速率相对较低,且饱水状态的试件在加载次数小于2000时,其蠕变速率高于浸水时的蠕变速率,之后又低于浸水时的蠕变速率,最终又远超出浸水时的蠕变速率,说明试件饱水时的剥落拐点较大,其抗剥落性能次之,试件浸水时抗剥落性最差;由图4可知,同干燥或水环境下,试件在60℃时的蠕变速率均小于50℃时的蠕变速率,且试件在60℃时较早出现剥落,蠕变速率下降较明显,由此说明温度对试件的抗剥落性能影响显著。

## 4 结语

本研究通过汉堡车辙试验,对排水沥青混合料在高温和雨水耦合条件下的抗水破坏性能进行了评估。得出如下结论:

1. 汉堡车辙试验的车辙变形试验结果表明,相同温度下,试件的车辙深度排序为:浸水>饱水>

干燥,同温度条件下,水环境越差,试件车辙越严重;60℃干燥、饱水、浸水条件下的最大车辙深度分别为50℃干燥、饱水、浸水条件下的1.95、2.54、2.60倍,同干燥或水环境下,温度越高,试件车辙越严重。水环境和温度都对排水沥青混合料的车辙深度有影响,水环境越差、温度越高,试件的车辙越严重。

2. 汉堡车辙试验的蠕变速率试验结果表明,50℃饱水、50℃浸水、60℃干燥、60℃饱水、60℃浸水条件的蠕变速率依次为50℃干燥的蠕变速率的89.7%、51%、53.1%、47.3%和41.3%。蠕变速率随着水量和温度的增加而逐渐衰减。随着水量及温度的提升剥落变形拐点值逐渐下降,试件抗剥落性能变差;50℃浸水与60℃饱水条件对排水沥青混合料抗剥落性能影响程度相当。蠕变速率随着水量和温度的增加而逐渐衰减,试件抗剥落性能也会变差。
3. 高温条件下排水沥青混合料的使用应该更加谨慎,因为车辙深度和蠕变速率都会增加,导致排水沥青混合料的变形和抗剥落性能降低。这些结论可以帮助公路工程技术专家制定排水沥青混合料的使用条件和温度范围,以确保其长期使用车辙深度不会过深,同时也可以为工程师提供最佳的使用条件和设计方案,以确保公路的长期稳定性和耐久性。

## 参考文献

- [1] Hu M, Li L, Peng F. laboratory investigation of OGFC-5 porous asphalt ultra-thin wearing course [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 219: 101-110.
- [2] 肖军, 尹强, 姜克锦, 李旭, 刘育江, 韩斌, 胡兆奇, 赵嵘琦. 复掺纤维改善高黏弹改性排水沥青混合料性能试验研究 [J]. *公路*, 2022, 67(08): 380-385.
- [3] 陈超, 范子然, 李闯民. 基于高黏剂改性排水沥青混合料的工艺对比研究 [J]. *中外公路*, 2020, 40(03): 237-240. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2020.03.050.
- [4] 于保阳, 刘美鸥, 张荣华, 陈希栋, 刘宇鹏. 复合改性排水沥青混合料配合比设计优化研究 [J]. *公路*, 2021, 66(05): 30-36.
- [5] 张皓东. 不同空隙率排水沥青混合料路用性能及堵塞衰变规律研究 [J]. *公路*, 2022, 67(09): 115-121.
- [6] 刘明金, 柯望, 李闯民. 基于路用性能的掺钢渣透水沥青混合料设计 [J]. *公路与汽运*, 2021(03): 68-73+77.
- [7] 王玉林, 卢东, 徐宁. 木质素纤维对再生排水沥青混合料路用性能研究 [J]. *公路*, 2021, 66(02): 52-56.
- [8] 郑茂. 水-热作用下胶粉改性沥青汉堡车辙高温性能 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(06): 2477-2484..
- [9] 杜荣耀, 林有贵. 汉堡车辙和 APA 车辙试验适用范围研究 [J]. *中外公路*, 2019, 39(05): 237-242. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2019.05.052.
- [10] 崔文博, 郝培文. 基于 Ham-burg 车辙试验的沥青路面车辙损坏分析 [J]. *中外公路*, 2014, 34(01): 95-98.
- [11] Safwan A. Khedr, Tamer M. Breakah. Rutting parameters for asphalt concrete for different aggregate structures [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2011, 12(1).
- [12] 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(03): 96-105.
- [13] 栗培龙, 张争奇, 李洪华, 王秉纲. 沥青混合料汉堡车辙试验条件及评价指标研究 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2011, 35(01): 113-117.
- [14] 郭勇. 高速公路排水性沥青混合料应用研究 [D]. 东南大学, 2006.
- [15] Donald Watson, Nam H. Tran, Carolina Rodezno, Adam J. Taylor. *Performance-Based Mix Design for Porous Friction Courses*. Washington, DC: The National Academies Press. 2018. <https://doi.org/10.17226/25173>.
- [16] 同卫刚. 生态型透水沥青路面结构设计性能研究 [D]. 长安大学, 2015.
- [17] 李卫勇, 张雷, 杨建华, 张争奇. 圆柱形试件用于国标车辙动稳定度试验的可行性分析 [J]. *重庆交通大学学报 (自然科学版)*, 2017, 36(12): 22-29.

## 作者简介

### 杨晚生

1969 年生, 高级工程师. 研究方向为公路桥梁工程技术和管理工作.

E-mail: 284922619@qq.com

### 刘群艳

1980 年生, 高级工程师, 研究方向为公路试验检测.

E-mail: 339024435@qq.com

### 甘新众

1969 年生, 高级工程师, 研究方向为公路桥梁工程施工技术.

E-mail: charmingcharming@163.com

### 李闯民

1965 年生, 博士, 教授, 研究方向为路面结构与材料教学与科研.

E-mail: lichuangmin@126.com