

连续高温作用下沥青路面车辙治理试验研究

曲乐永¹, 马文倩²

(1. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京市 100082; 2. 北京市城市道路养护管理中心, 北京市 100069)

摘要: 在全球气候变暖与城市热岛效应的共同作用下, 北京市高温天气频次及连续高温时长显著增加, 沥青路面的高温稳定性面临严峻考验。以北京市崇文门西大街为工程背景, 分别将高黏高弹聚合物改性沥青混合料和高模量沥青混合料铺筑于试验段, 以验证工程应用效果。在经历了2025年夏季连续的高温作用后, 试验段路面未出现明显车辙, 表明2种新型抗车辙沥青混合料均具备优良的高温抗变形能力与路用性能, 可有效解决连续高温条件下重载路段车辙病害频发的问题, 可为同类城市道路车辙治理提供参考。

关键词: 连续高温; 重载交通; 沥青路面; 车辙病害

中图分类号: U416

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0035-06

Experimental Study on Rutting Control of Asphalt Pavement under Continuous High Temperature

QU Leyong¹, MA Wenqian²

(1. Beijing General Municipal Engineering Design and Research Institute, Beijing 100082, China; 2. Beijing Urban Road Maintenance and Management Center, Beijing 100082, China)

Abstract: Under the combined effect of global warming and urban heat island effect, the frequency and duration of consecutive high-temperature weather in Beijing have increased significantly, posing a severe challenge to the high-temperature stability of asphalt pavements. Based on the engineering project of Chongwenmen West Street in Beijing, test sections are paved with high-viscosity high-elastic polymer modified asphalt mixture and high-modulus asphalt mixture respectively to verify the engineering application effects. After experiencing the consecutive high-temperature weather in the summer of 2025, no obvious rutting occurred on the test pavement. The test results show that both new anti-rutting asphalt mixtures exhibit excellent high-temperature deformation resistance and pavement performance, which can effectively solve the frequent rutting distress of heavy-duty road sections under continuous high-temperature conditions, and provide references for rutting treatment of similar urban roads.

Keywords: continuous high temperature; heavy-load traffic; asphalt pavement; rutting distress

0 引言

作为超大城市,北京市的人口、产业与建筑高度密集,同时在全球气候变暖和城市热岛效应的共同作用下,北京市的高温天气频次明显增加。据统计,近5年(2020—2024年)北京市年最高温均值约为38.8℃,6—8月高温天数($\geq 35^\circ\text{C}$)呈现逐年增多趋势,2023—2024年,高温天数均值为43.5 d。极端高温天气给沥青路面的稳定性带来较大挑战。研究表明^[1-5],在持续高温天气的影响下,沥青路面的路表温度每天有超过5 h处于60℃以上,最高值甚至超过70℃;中面层温度每天有超过5 h接近或高于

60℃。有试验验证,当温度超过60℃时,沥青混合料的抗变形能力将急剧衰减^[6-11],导致车辙病害凸显,尤其是在交叉口处。而使用抗车辙沥青混合料,是处理车辙病害的重要手段之一^[12]。部分位置(如公交站、交叉口进口道等处)由于受重载交通的影响极大,即使采用常规的抗车辙沥青混合料处理车辙,之后病害仍会反复出现。崇文门西大街车辙病害便具有上述典型特征,因此,本文将作为试验对象,通过在试验段铺筑2种新型抗车辙沥青混合料,验证新材料在连续高温条件下的使用效果。

1 工程概况及现状病害

崇文门西大街位于北京市东城区,道路东起崇文门路口,西至台基厂大街,规划为城市主干路,总长度约为0.591 km。道路断面为3幅路型式,标准段

收稿日期: 2026-04-08

作者简介: 曲乐永(1986—),男,硕士,高级工程师,从事道桥设计工作。

机动车道宽度为22.2 m。该段道路路面结构建成于60年代末期,并于2002年和2010年分别进行大修改造,现状路面为混凝土板上加铺11~17 cm厚沥青混合料。由于车辙病害严重(见图1),2021年,该路段开展了车辙专项整治,采用了双层抗车辙沥青混合料的结构组合方式。经过2年使用,2023年底,该路段同样的位置又出现严重的车辙病害,车辙最大深度达到80 mm(见图2)。



图1 2021年维修前路面车辙状况



图2 2024年维修前路面车辙状况

2 问题分析及解决方案

2.1 问题分析

2010年,该路段大修,对病害位置采用“4 cm厚ARAC-13橡胶沥青混合料+5 cm厚AC-16C改性中粒式沥青混凝土”进行处理。11年后,该路段出现较为严重的车辙。2021年,车辙专项整治针对病害位置,采用“4 cm厚KSMA-13抗车辙沥青玛蹄脂碎石混合料+6 cm厚KAC-20抗车辙中粒式沥青混凝土”进行处理。2年后,该路段出现更为严重的车辙。表1为2010年和2021年道路养护时各层沥青混合料的动稳定度控制标准。虽然动稳定度控制标准有了较大提升,但受到各因素的影响,车辙病害发生的时间间隔反而大幅缩短。

维修阶段	60℃动稳定度	
	上面层	中面层
2010年道路大修	>3 000	>2 800
2021年车辙专项	>7 000	>6 000

沥青路面产生车辙的根本原因是沥青混合料在剪切力的作用下产生流动变形,荷载、温度变化对路面的影响极大^[13]。在道路运营期间,崇文门西大街内的公交线路基本稳定(见表2),交通组织方式(如

交叉口渠化形式等)自2010年以后未发生变化,基本排除荷载变化对车辙病害的影响。

表2 2010—2025年崇文门大街公交站公交线路调整情况	
时间段	公交线路调整情况
2010—2021年	撤销729路,增加622路 撤销59路,增加20路
2021—2023年	103路增设站点
2024—2025年	取消20路

注:目前崇文门西大街公交站公交线路为11条。

本文对2011年以来北京市每年6—9月的日最高气温进行统计,具体情况如下。

2.1.1 年最高气温

除2015年外,2011—2021年,年最高气温为36~38℃;2022—2024年,年最高气温维持在较高水平,且呈现上升趋势(见图3)。

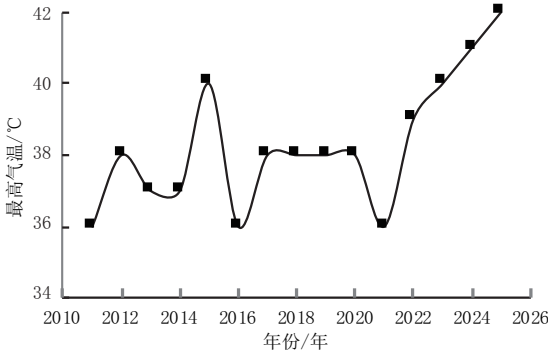


图3 2011—2024年最高气温

2.1.2 高温(≥35℃)天数

高温(≥35℃)天数总体呈上升趋势,2023年和2024年,高温天数均超过40 d(见图4,虚线为趋势线)。

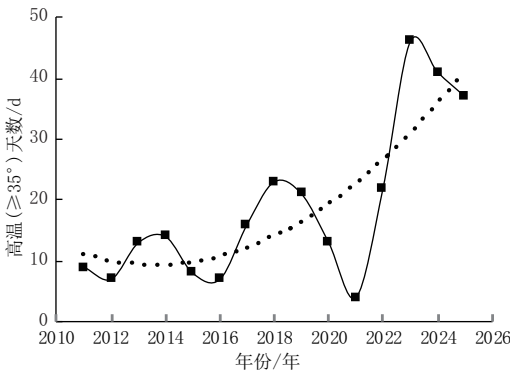


图4 2011—2024年高温(≥35℃)天数

2.1.3 连续高温(≥35℃)天数

研究表明,在连续高温的天气,路面在重载交通作用下更易在短时间内产生车辙。本文对2011—2024年最长连续高温(≥35℃)天数进行统计(见图5)发现,2023年以前,连续高温现象不明显;2023年6月末至7月初连续出现21 d高温天气;2024年连续

高温时长虽然比 2023 年短,但在频次上与 2023 年处于同一水平。

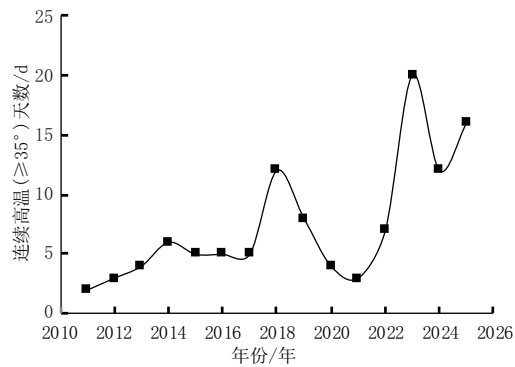


图5 2011—2024 年连续高温(≥35 °C)天数

由上述分析可知,与往年相比,2023 年、2024 年北京市出现连续高温的现象非常明显,加速了车辙病害的产生。

2.2 解决方案

为解决连续高温条件下沥青路面车辙病害反复发生的问题,本文采用 2 种新型抗车辙沥青混合料进行试验验证,具体操作如下。

2.2.1 高黏高弹聚合物改性沥青混合料

上面层采用 4 cm 厚高黏高弹聚合物改性沥青磨耗层。下面层采用 7.5 cm 厚高黏高弹聚合物改性沥青调平层。

2.2.2 高模量沥青混合料

上面层采用 4 cm 厚 SMA-13 沥青玛蹄脂碎石混合料。下面层采用 7.5 cm 厚高模量沥青混合料。

3 高黏高弹聚合物改性沥青混合料

该混合料是一种以高黏高弹聚合物改性沥青为胶结材料,采用高沥青用量骨架密实型级配设计形成的新型沥青混凝土结构层。成型后的路面,相较于传统沥青混凝土材料,具有更优越的抗裂、抗车辙和抗水损害性能。

3.1 沥青结合料

试验采用高黏高弹聚合物改性沥青,并对 60 °C 复合剪切模量 G^* 、60 °C 动力黏度,以及 $G^*/\sin\delta\geq 2.2$ kPa 临界温度 3 个指标作出要求,以提高混合料的路用性能。具体技术指标如表 3 所示。

3.2 粗集料

粗集料应采用洁净、干燥、无风化的碎石,并具备足够的强度和耐磨性,宜优先采用玄武岩、辉绿岩等作为磨耗层的粗集料。具体技术指标如表 4 所示。

表 3 高黏高弹聚合物改性沥青技术指标

试验项目	试验结果
软化点/ $^{\circ}\text{C}$	96.5
针入度(25 $^{\circ}\text{C}$ 、5 s、100 g)/0.1 mm	51
闪点/ $^{\circ}\text{C}$	268
溶解度(三氯乙烯)/%	99.7
弹性恢复(25 $^{\circ}\text{C}$)/%	99
60 $^{\circ}\text{C}$ 复合剪切模量 G^*/kPa	16.3
60 $^{\circ}\text{C}$ 动力黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	612 087
TFOT(或 RTFOT)后残留物	
质量损失/%	-0.254
针入度比(25 $^{\circ}\text{C}$)/%	78.4
$G^*/\sin\delta\geq 2.2$ kPa	
临界温度/ $^{\circ}\text{C}$	113

表 4 高黏高弹聚合物粗集料技术指标

试验项目	试验结果
压碎值/%	16.6
洛杉矶磨耗损失/%	17.8
表观相对密度	2.822
吸水率/%	0.73
细长扁平颗粒含量(3:1)/%	10.1
与沥青的黏附性/级	5
<0.075 mm 颗粒含量/%	0.4
坚固性/%	9
软石含量/%	1.6

3.3 细集料

细集料应采用机制砂,须为 100% 破碎加工而成,应洁净无杂质,满足 0 ~ 3 mm 的规格。细集料须采用中性、碱性机制砂,具体技术指标如表 5 所示。

表 5 高黏高弹聚合物细集料技术指标

试验项目	试验结果
砂当量/%	72
坚固性(>3 mm 部分)/%	6.8
表观相对密度	2.786

3.4 填料

填料应干燥、洁净,能从填料仓自由地流出。填料应采取有效的防潮措施,以防止出现结团现象。具体技术指标如表 6 所示。

表 6 高黏高弹聚合物填料技术指标

指标	试验结果	
表观密度/(t·m ⁻³)	2.796	
含水率/%	0.3	
粒度范围/%	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	92.5
	<0.075 mm	82.7
外观	无团粒、不结块	
亲水系数	0.8	
塑性指数/%	3.3	

3.5 黏层油

黏层油采用高黏改性乳化沥青,技术指标如表7所示。

表7 高黏高弹聚合物黏层油技术指标	
试验项目	试验结果
粒子电荷	阳离子(+)
黏度(沥青标准黏度计C _{25,3})/s	36
筛上残留物(1.18 mm筛)/%	0.016
蒸发残留物	
残留分含量/%	63
针入度(25℃)/0.1 mm	53
软化点/℃	92
延度(5℃)/cm	37
溶解度/%	99.1
弹性恢复(25℃)/%	96.5

3.6 级配

矿料级配为特殊骨架密实型,级配如表8所示。

表8 高黏高弹聚合物混合料的矿料级配						
级配类型 (筛孔大小)/mm	磨耗层			调平层		
	上限	下限	实测	上限	下限	实测
通过筛孔 的质量 百分率/%	26.5	—	—	100	90	96.9
	19	—	—	90	75	83.9
	16	100	100	80	65	72.4
	13.2	100	90	75	55	64.3
	9.5	75	50	66.1	52	34
	4.75	40	18	28.9	34	16
	2.36	30	13	22.0	28	12
	1.18	24	8	18.0	24	8
	0.6	18	6	14.3	18	6
	0.3	15	5	10.3	14	5
	0.15	12	4	7.4	12	4
	0.075	8	3	5.7	8	3
						5.5

3.7 路用性能

混合料应具备良好的施工和易性及相关路用性能,技术指标如表9所示。

表9 高黏高弹聚合物混合料的技术指标		
试验项目	磨耗层 试验结果	调平层 试验结果
空隙率(VV)/%	4.4	4.5
沥青用量(油石比)/%	6.1	5.2
沥青饱和度(VFA)/%	75.7	71.4
稳定度(MS)/kN	11.21	10.56
粗集料骨架间隙率(VCA _{mix})	40.4	—
矿料间隙率(VMA)/%	18.3	15.6
60℃动稳定度/(次·mm ⁻¹)	9 543	8 921
肯塔堡飞散试验损失/%	5.2	—
冻融劈裂强度比/%	87.3	85.5
马歇尔残留稳定度/%	90.3	89.3
渗水系数/(mL·min ⁻¹)	基本不透水	基本不透水

4 高模量沥青混合料

高模量沥青材料是一种针对高温重载交通开发的特殊沥青混合料,用于解决高温、重载交通条件下路面出现车辙等变形或破坏问题。

4.1 沥青结合料

试验采用改性天然沥青^[14-15],沥青技术指标如表10所示。

表10 高模量改性沥青技术指标	
试验项目	试验结果
软化点/℃	76
针入度(25℃、5 s、100 g)/0.1 mm	25
延度(25℃、5 cm/min)/cm	43.7
闪点/℃	296
密度(25℃)/(g·cm ⁻³)	1.206
弹性恢复(25℃)/%	86
布氏旋转黏度(175℃)/(Pa·s)	2.6
灰分含量/%	17.1
离析,48 h软化点差/℃	1.3
TFOT(或RTFOT)后残留物	
质量变化/%	-0.37
针入度比(25℃)/%	84
延度(25℃、5 cm/min)/cm	38.2

4.2 粗集料

粗集料采用玄武岩,保证质地坚硬,表面粗糙、耐磨,应洁净、干燥、无杂质,具有足够的强度和良好的颗粒形状。技术指标如表11所示。

表11 高模量粗集料技术指标	
试验项目	试验结果
洛杉矶磨耗损失/%	22.1
石料压碎值/%	18.7
表观相对密度	2.815
吸水率/%	0.62
坚固性/%	9.6
针片状颗粒含量(混合料)/%	—
其中粒径大于9.5 mm含量/%	8.9
其中粒径小于9.5 mm含量/%	10.2
水洗法<0.075 mm颗粒含量/%	0.4
软石含量/%	1.8
与沥青的黏附性/级	5

4.3 细集料

细集料应洁净、干燥、无风化、无杂质,并有适当的颗粒级配^[16],技术指标如表12所示。

表12 高模量细集料技术指标	
试验项目	试验结果
表观相对密度	2.772
砂当量/%	71
棱角性(流动时间)/s	36

4.4 填料

填料必须采用石灰岩石料经磨细后得到的矿粉,原石料中的泥土杂质应除净。填料要求干燥、洁净,能从矿粉仓自由地流出^[16],技术指标如表 13 所示。

表 13 高模量填料技术指标

指标	试验结果	
含水量/%	0.3	
表观密度/(t·m ⁻³)	2.797	
粒度范围/%	<0.6 mm	100
	<0.15 mm	92.3
	<0.075 mm	81.9
外观	无团粒、不结块	
亲水系数	0.8	
塑性指数/%	3.1	
加热安定性	无变化	

4.5 黏层油

黏层油采用 PCR-SBS 改性乳化沥青,沥青含量不小于 60%,喷洒量控制在 0.5 L/m²,技术指标如表 14 所示。

表 14 高模量黏层油技术指标

试验项目	试验结果
粒子电荷	阳离子(+)
破乳速度	快裂
筛上残留物 (1.18 mm 筛)/%	0.023
黏度(沥青标准黏度计 C _{25,3})/s	26
蒸发残留物	
残留分含量/%	57
溶解度/%	99.6
针入度(25 ℃)/0.1 mm	48
延度(5 ℃)/cm	35
软化点/℃	86
与粗集料的黏附性,裹覆面积	≥2/3
1 d 常温贮存稳定性/%	0.3
5 d 常温贮存稳定性/%	2.6

4.6 级配

矿料级配如表 15 所示。

表 15 高模量混合料矿料级配

级配类型(筛孔大小)/mm	上限	下限	实测
通过筛孔 的质量百分率/%	19	100	100
	16	100	95.0
	13.2	—	89.0
	9.5	84	69.3
	4.75	64	46.0
	2.36	42	30.8
	0.075	8	6.6

注:“—”表示该粒径不受控制。

4.7 路用性能

混合料主要路用性能指标如表 16 所示。

表 16 高模量混合料技术指标要求

试验项目	试验结果
沥青用量(油石比)/%	6.5
空隙率(VV)/%	2.9
沥青饱和度(VFA)/%	81.8
稳定度(MS)/kN	19.86
冻融劈裂强度比/%	85.4
马歇尔残留稳定度/%	89.5
60 ℃动稳定度/(次·mm ⁻¹)	10 524
低温弯曲应变(-10 ℃、50 mm/min)/με	2 649
渗水系数/(mL·min ⁻¹)	基本不透水

5 效果验证

项目于 2024 年 10 月底完工,至 2026 年初已运营近一年半时间,经历了 2025 年夏季高温天气。2025 年最高气温为 42 ℃,高温天数达 37 d,连续高温(≥ 35 ℃)天数为 16 d,与 2023 年、2024 年的连续高温情况基本一致。

至本文发布前,路面未出现明显车辙(见图 6、图 7),说明 2 种新型混合料对预防连续高温天气下路面的车辙病害具有显著效果。



图 6 高黏高弹聚合物改性沥青混合料试验段前后对比



图 7 高模量沥青混合料试验段前后对比

6 结 语

(1)随着北京市连续高温天气显著增多,在重载交通的持续作用下,沥青路面抗形变能力急剧下降,连续高温成为车辙病害快速发生的关键诱因,而采用常规抗车辙混合料,已无法解决车辙快速复发的问题。

(2)高黏高弹聚合物改性沥青混合料与高模量

沥青混合料均具备优良的路用性能。经试验验证,2种新型混合料均可适应连续高温与路面重载耦合作用的复杂环境。

(3)采用2种新型混合料的试验段,经过近一年半的运营考验,在与2023—2024年相近的连续高温条件下,未出现明显车辙,治理效果显著。这说明,2种新型混合料均可有效解决崇文门西大街这类重载交叉口车辙反复出现的工程难题。

参考文献:

- [1] 张宗涛.持续极端高温条件下的沥青路面抗永久变形研究[D].西安:长安大学,2018.
- [2] 黄立葵,贾璐,万剑平,等.沥青路面温度状况的统计分析[J].中南公路工程,2005,30(3):8-9;57.
- [3] 熊星.巴基斯坦极端高温及重载条件下路面抗车辙对策研究[D].昆明:昆明理工大学,2018.
- [4] 韩丁丁,张金喜,魏建军.北京地区沥青路面结构内部温度变化规律[J].北京工业大学学报,2015,41(4):566-572.
- [5] 王辉,李雪连,张起森.高温重载作用下沥青路面车辙研究[J].土木工程学报,2009,42(5):139-144.
- [6] 郭仪南,张宏超,王健,等.城市热岛效应对沥青路面温度场及其力学性能的影响[J].公路交通科技(应用技术版),2010,29(4):548-551;596.
- [7] 朱洪洲,黄晓明.沥青混合料高温稳定性影响因素分析[J].公路交通科技,2004,21(4):1-4;8.
- [8] 黄晓明,范要武,赵永利,等.高速公路沥青路面高温车辙的调查与试验分析[J].公路交通科技,2007,24(5):16-20.
- [9] 曹久林.沥青路面温度场及应力场的数值模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2012.
- [10] Pu L, Fu J H, Sun L H, et al. Analysis of rutting formation mechanisms and influencing factors in asphalt pavements under slow-moving heavy loads[J]. Materials, 2025, 18(17): 4153.
- [11] 张久鹏,裴建中,王秉纲.连续变温下沥青路面车辙分析与高温预警[J].同济大学学报(自然科学版),2011,39(2):242-246;258.
- [12] 高立波.沥青路面结构抗车辙的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [13] 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.
- [14] DB 61/T 1332—2020 天然沥青高模量混合料施工技术规范[S].
- [15] T/CHTS 10031—2021 稳定型天然沥青改性沥青路面技术规范[S].
- [16] JTG F40—2004 公路沥青路面施工技术规范[S].
- [3] Nazirizad M, Kavussi A, Abdi A. Evaluation of the effects of anti-stripping agents on the performance of asphalt mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 348-353.
- [4] Hamed G, Tahami S. The effect of using anti-stripping additives on moisture damage of hot mix asphalt[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018, 81: 90-97.
- [5] 杨瑞华,许志鸿,张超,等.沥青混合料分形级配理论[J].同济大学学报(自然科学版),2008,36(12):1642-1646.
- [6] 董泽蛟,肖桂清,龚湘兵.级配及抗车辙剂对沥青混合料抗车辙性能的影响分析[J].公路交通科技,2014,31(2):27-31;46.
- [7] 俞方喆,陈欣.沥青拌合楼振动筛孔配置对混合料性能影响[J].城市道桥与防洪,2026(1):329-333.
- [8] 郝晟.沥青混合料目标配合比级配控制关键技术[D].哈尔滨工业大学,2022.
- [9] 刘海婷.集料指标波动对高模量沥青混合料路用性能的影响研究[J].城市道桥与防洪,2025(3):280-283;288.
- [10] 李大勇.沥青混合料变异性与拌合楼生产过程控制[J].公路工程,2013,38(6):245-249.
- [11] 张维仁,张耀东,王永平.基于迭代法沥青拌合楼称量系统研究[J].内蒙古科技与经济,2016(24):77-79.
- [12] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [13] 许新权,唐胜刚,杨军.粉胶比对沥青胶浆高温性能的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2020,40(4):14-26.
- [14] Cheng Y, Tao J, Jiao Y, et al. Influence of the properties of filler on high and medium temperature performances of asphalt mastic[J]. Construction and Building Materials, 2016, 118: 268-275.
- [15] 张玉富.排水沥青混合料耐久性能研究[J].城市道桥与防洪,2017(5):276-278.

(上接第18页)