

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.04.017

基于加速加载试验的改扩建工程旧路材料性能衰变规律研究*

江臣¹, 杨洋¹, 马永磊¹, 郑炳锋^{2,3,4}, 吕正龙^{2,3}, 吴威伟^{2,3}

(1.江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004; 2.苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019; 3.新型道路材料国家工程研究中心, 江苏 南京 211112; 4.东南大学, 江苏 南京 211189)

摘要: 针对高速公路改扩建工程旧路材料, 在加速加载足尺试验 0~120 万次的条件下, 对旧路沥青面层芯样进行重复荷载蠕变试验和半圆弯曲试验, 对旧路基层芯样进行回弹模量试验、无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验。结果表明, 随着加载次数的增加, 相对于加载前, 旧路沥青面层的蠕变次数呈下降趋势, 蠕变次数指数则有增有减; 在相同加载次数下对加铺层、上面层、中面层、下面层分别取芯, 同一结构层芯样的半圆弯曲试验应变能释放速率波动明显。随着加载次数的增加, 旧路上基层的回弹模量总体呈现上升趋势, 下基层的回弹模量总体处于稳定状态; 旧路基层的无侧限抗压强度出现一定波动, 加载 80 万次时无侧限抗压强度达到最高, 120 万次时出现下降; 旧路基层的劈裂强度出现一定波动。经过 120 万次的加速加载足尺试验, 该高速公路改扩建工程旧路沥青面层的高温性能与抗裂性能及基层的力学性能总体处于稳定状态, 扩建后的试验车道在低荷载情况下满足路用性能要求。

关键词: 公路; 改扩建工程; 沥青面层; 半刚性基层; 加速加载试验; 材料性能

中图分类号: U418.8

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)04-0086-06

高速公路改扩建中, 通常采用对老路进行局部病害处置后加铺沥青面层的方案^[1-3], 旧路结构的剩余寿命评价很重要。加速加载足尺试验通过可控制的较重轴载在短时间内对足尺路面进行加速加载^[4-5], 模拟较长时间内实际交通荷载对路面结构的破坏作用, 比室内试验更真实、更接近自然环境条件, 数据更可靠, 是研究路面结构与材料全寿命周期服役行为及演化规律的有效手段^[6-10]。本文采用加速加载足尺试验对高速公路改扩建工程旧路沥青面层和基层材料性能开展研究, 在不同加载次数下对旧路沥青面层进行重复荷载蠕变试验和半圆弯曲试验, 对旧路基层进行回弹模量试验、无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验, 分析旧路材料性能的衰变规律, 以指导高速公路改扩建工程旧路维修与施工。

1 工程概况

京沪(北京—上海)高速公路淮江(淮安—江都)段路面结构为 5 cm SBS 改性沥青 AK-16+5 cm 70[#] 道路石油沥青 AC-25+7 cm 70[#] 道路石油沥

青 AC-25+39 cm 二灰碎石基层+20 cm 二灰土底基层。2010—2011 年对该路段进行改扩建, 病害修补完成后进行罩面处理, 罩面结构为 4 cm SBS 改性沥青 AC-13。改扩建前后路面结构见图 1。

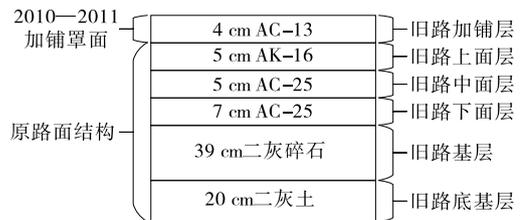


图 1 京沪高速公路淮江段改扩建前后路面结构

2 加速加载试验方案

2.1 加速加载设备

加速加载设备采用 MLS66, 其最大加载频率为 6 000 次/h, 相当于 22 km/h 的行车速度; 轴载调整范围为 50~75 kN, 且连续可调, 可模拟单轴 100~150 kN 的轴载; 加载段长度为 7.7 m, 其中有效加载段长度为 6.6 m(见表 1)。

* 基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2018Y27)

表1 MLS66 的主要技术参数

参数名称	参数范围	说明
有效加载段长度/m	6.6	轮载恒定情况下加载轮与路面接触的距离
模拟荷载	单轴双轮或单轴单轮	加载轮为半轴
轴载/kN	50~75	可从50 kN连续调整至75 kN
轮胎压力/MPa	0.4~1.0	胎压可连续调整
加载运行速度/(km·h ⁻¹)	5~22	—
加载频率/(次·h ⁻¹)	1 500~6 000	最大加载频率时对应22 km/h的行车速度
最大横向移动距离/mm	±500	—

2.2 加载方案

2020年10—11月,对京沪高速公路淮江段改扩建工程K721+660路段开展现场加速加载试验,采用标准轴载和自然温度的加载方式,累计完成120万次加载。分别对0、40万次、80万次、120万次的加载段落钻取芯样,对沥青面层材料进行重复荷载蠕变试验和半圆弯曲试验,对基层材料进行回弹模量试验、无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验^[11]。

3 试验方法

3.1 旧路沥青面层材料试验

3.1.1 重复荷载蠕变试验

重复荷载蠕变试验在规定温度(路面设计高温)条件下进行。对试件施加轴向正弦波荷载,荷载周期为1 s(加载0.1 s,间歇0.9 s),加载至试件破坏。试件尺寸为 $\phi 100\text{ mm} \times 150\text{ mm}$,最大加载次数为10 000次,通常情况下不设置围压,由仪器自动得出试件破坏点,记录相应应变,评价指标为应变速率达到最低点时的加载次数即蠕变次数(见图2)和蠕变次数指数(蠕变应变和蠕变次数的比值)。

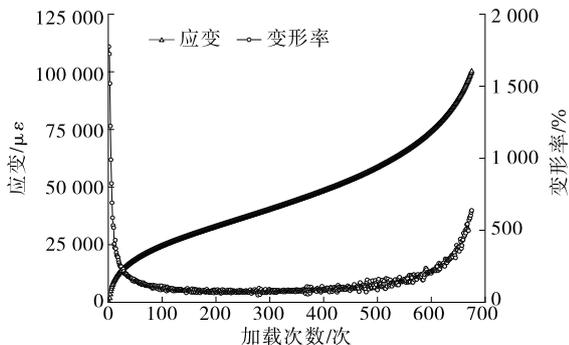


图2 循环加载试验过程中试件永久变形的演变规律

3.1.2 半圆弯曲试验

半圆弯曲试验用于评价反射裂缝和疲劳裂缝。试验采用三点加载模式,试件直径为150 mm,厚

度为38~60 mm,开口深度分别为25.4 mm、31.8 mm、38.0 mm。试验加载模式及试件形状见图3。试验温度为25 ℃,加载速率为0.5 mm/min。荷载—位移曲线见图4。



图3 半圆弯曲试验

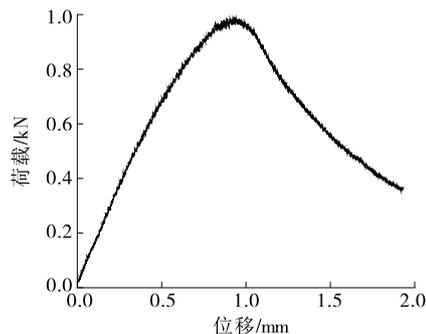


图4 荷载—位移曲线

试验评价指标为临界应变能释放速率 J_c ,其计算公式如下:

$$J_c = \frac{-1}{b} \left(\frac{dU}{da} \right) \quad (1)$$

式中: J_c 为临界应变能释放速率(kJ/m²); b 为试件厚度(m); U 为试件破坏时的累积能量(kJ),即荷载—跨中挠度曲线下的面积,按式(2)计算; a 为开口深度(m); dU/da 为不同开口深度下破坏时的累积能量变化(kJ/m)。

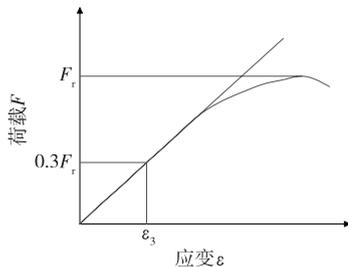
$$U = \sum_{i=0}^n [(x_{i+1} - x_i)y_i + 0.5(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)] \quad (2)$$

式中: x_i 为第*i*点的竖向位移(mm); x_{i+1} 为*i*+1点的竖向位移(mm); y_i 为*i*点的荷载(kN); y_{i+1} 为*i*+1点的荷载(kN)。

3.2 旧路半刚性基层材料试验

3.2.1 回弹模量试验

单轴压缩模量试验按 JTG D50—2017《公路沥青路面设计规范》^[12]进行,采用中间段法测量压缩应变,刚性环通过螺栓固定在圆柱体试件侧面,3个位移传感器固定在其中一个刚性环上。试件直径×高度分别为 100 mm×150 mm、150 mm×150 mm、150 mm×300 mm。压力机以 1 mm/min 的加载速度连续均匀施加荷载,直至试件破坏。记录每隔 0.01 s 的荷载和试件轴向变形,取 3 个位移传感器所测试件变形的平均值作为试验结果。图 5 为荷载—应变曲线。



F_r 为最大荷载(N); ϵ_3 为加载达到 $0.3F_r$ 时试件纵向压应变

图 5 单轴压缩模量荷载—应变曲线

根据荷载—应变曲线得到最大荷载 F_r 和 $0.3F_r$ 时压应变,按下式计算试件的弹性模量:

$$E = \frac{1.2F_r}{\pi D \epsilon_3} \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量(MPa); D 为试件直径(mm)。

3.2.2 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验参照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[13]进行,采用压力机进行测试。将基层芯样切割为直径 150 mm、高 150 mm 的标准试件,试件两顶面不平时用快凝水泥砂浆抹平。试验过程中保持加载速率为 1 mm/min,记录试件破坏时的最大压力 P ,按下式计算试件的无侧限抗压强度:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (4)$$

式中: R_c 为试件的无侧限抗压强度(MPa); A 为试件的截面积(mm^2)。

3.2.3 劈裂强度试验

劈裂强度按照 JTG E51—2009《公路工程无机

结合料稳定材料试验规程》^[13]进行,试件直径为 150 mm,加载速率为 1 mm/min。记录试件破坏时的最大压力 P ,按下式计算试件的间接抗拉强度:

$$R_i = 0.004 178 \frac{P}{h} \quad (5)$$

式中: R_i 为试件的间接抗拉强度(MPa); h 为浸水后试件高度(mm)。

4 试验结果与分析

4.1 旧路沥青面层材料试验

4.1.1 重复荷载蠕变试验

钻取旧路经不同足尺加速加载次数后的芯样,测量不同加载次数芯样的蠕变次数和蠕变应变,计算其蠕变次数指数,结果见表 2、图 6。从表 2 和图 6 可以看出:随着加载次数的增加,相对于加载前,沥青面层芯样的蠕变次数呈下降趋势,蠕变次数指数则有增有减,不同加载次数下两指标的变化见表 3。

表 2 沥青面层芯样的重复荷载蠕变试验结果

加载次数/万次	试验编号	蠕变次数/次	蠕变应变/ $\mu\epsilon$	蠕变次数指数/ $(\mu\epsilon \cdot \text{次}^{-1})$
0	1	279	38 755	138.9
	2	168	30 952	184.2
40	1	178	21 506	120.8
	2	152	22 793	150.0
80	1	120	29 282	244.0
	2	146	27 574	188.9
120	1	193	31 792	164.7
	2	147	32 281	219.6

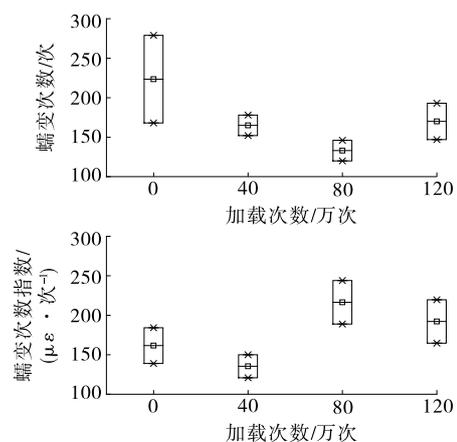


图 6 沥青面层芯样的重复荷载蠕变试验结果

表3 不同加载次数下沥青面层蠕变次数和蠕变次数指数相对于加载前的变化

加载次数/万次	蠕变次数		蠕变次数指数	
	变化量/次	变化率/%	变化量/ $(\mu\epsilon \cdot \text{次}^{-1})$	变化率/%
40	-58.50	-26.17	-26.15	-16.19
80	-90.50	-40.49	54.90	33.98
120	-53.50	-23.94	30.60	18.94

4.1.2 半圆弯曲试验

各结构层半圆弯曲试验结果见表4、图7。从表4和图7可以看出:在相同加载次数下对加铺层、上面层、中面层、下面层分别取芯,同一结构层芯样的半圆弯曲试验应变能释放速率波动明显。

4.2 旧路基层材料试验

4.2.1 回弹模量试验

旧路基层芯样回弹模量试验结果见表5、图8。从表5和图8可以看出:随着加载次数的增加,旧路

表4 各结构层半圆弯曲试验结果

结构层	加载次数/万次	试验编号	不同开口深度下断裂能/J		应变能释放速率/ $(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$	结构层	加载次数/万次	试验编号	不同开口深度下断裂能/J		应变能释放速率/ $(\text{J} \cdot \text{m}^{-2})$
			25 mm	38 mm					25 mm	38 mm	
加铺层	0	1	0.624 1	0.294 4	444.9	中面层	0	1	0.932 1	0.292 9	862.6
		2	0.291 6	0.249 4	57.0			2	0.662 8	0.398 7	356.4
	40	1	0.529 3	0.315 1	289.1		40	1	0.477 8	0.289 0	254.8
		2	0.539 5	0.180 9	483.9			2	0.493 6	0.361 2	178.7
	80	1	0.477 2	0.264 3	287.3		80	1	0.632 1	0.160 9	635.9
		2	0.601 1	0.408 4	260.1			2	0.275 9	0.226 3	66.9
上面层	120	1	0.557 5	0.206 8	473.3	120	1	0.447 1	0.140 0	414.4	
		2	0.470 2	0.277 3	260.3		2	0.646 9	0.232 7	559.0	
	0	1	0.417 0	0.292 2	168.4	0	1	0.634 7	0.329 5	411.9	
		2	0.348 9	0.299 8	66.3		2	0.448 6	0.315 6	179.5	
40	1	1.056 0	0.532 8	706.1	40	1	0.748 1	0.492 7	344.7		
	2	0.537 4	0.280 0	347.4		2	0.860 6	0.512 8	469.4		
80	1	0.349 0	0.188 8	216.2	80	1	0.426 6	0.185 0	326.0		
	2	0.463 4	0.365 1	132.7		2	0.326 9	0.124 4	273.3		
120	1	1.163 0	0.373 6	1 065.3	120	1	0.253 3	0.198 5	74.0		
	2	0.612 4	0.456 8	210.0		2	0.285 8	0.115 2	230.2		

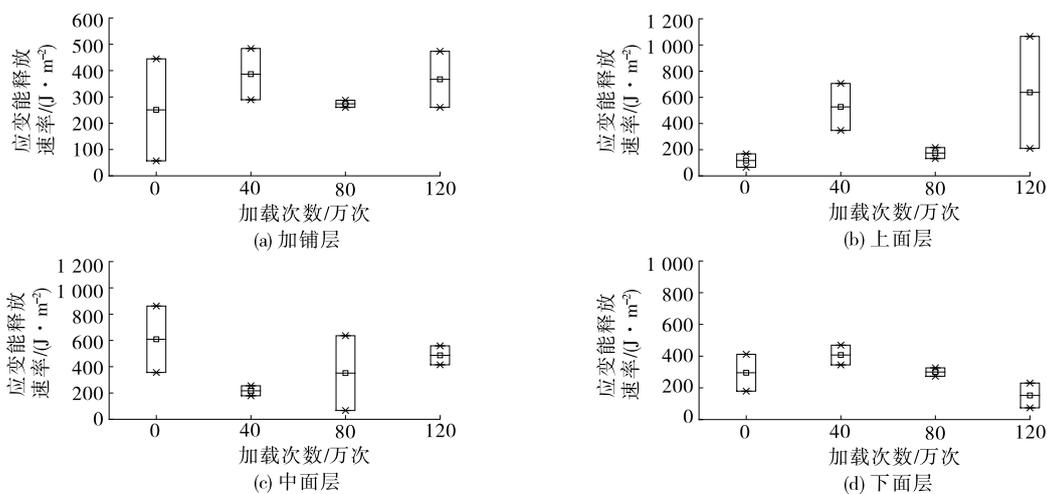


图7 各结构层半圆弯曲试验应变能释放速率

上基层的回弹模量总体呈现上升趋势,下基层的回弹模量总体处于稳定状态。

表 5 旧路基层芯样回弹模量试验结果

加载次数/ 万次	试验编号	回弹模量/MPa	
		上基层	下基层
0	1	21 981.21	22 136.26
	2	33 368.50	20 800.21
40	1	25 588.72	35 214.98
	2	8 916.638	7 667.166
80	1	36 888.86	27 882.81
	2	33 619.75	45 100.97
120	1	73 490.56	13 468.61
	2	83 490.56	22 136.26

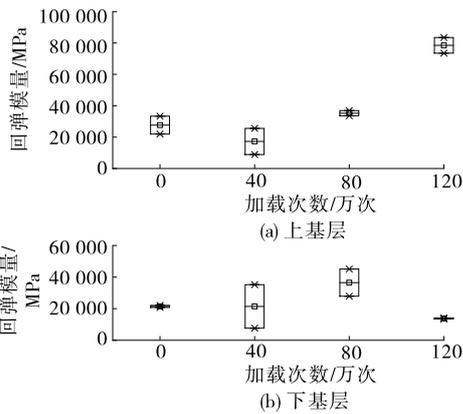


图 8 旧路基层芯样的回弹模量

4.2.2 无侧限抗压强度试验

旧路基层芯样无侧限抗压强度试验结果见表 6、图 9。从表 6 和图 9 可看出:加载 80 万次后旧路基层芯样的无侧限抗压强度达到最高,120 万次时出现下降,随着加载次数的增加,无侧限抗压强度出现一定波动。

表 6 旧路基层芯样无侧限抗压强度试验结果

加载次数/ 万次	试验编号	抗压强度/MPa			
		上基层		下基层	
		试验值	平均值	试验值	平均值
0	1	15.7	16.1	14.9	16.4
	2	16.5	16.1	17.9	16.4
40	1	14.9	15.3	14.0	16.2
	2	15.6	15.3	18.3	16.2
80	1	18.6	17.7	20.0	20.7
	2	16.8	17.7	21.3	20.7
120	1	15.5	14.7	16.4	15.7
	2	13.8	14.7	14.9	15.7

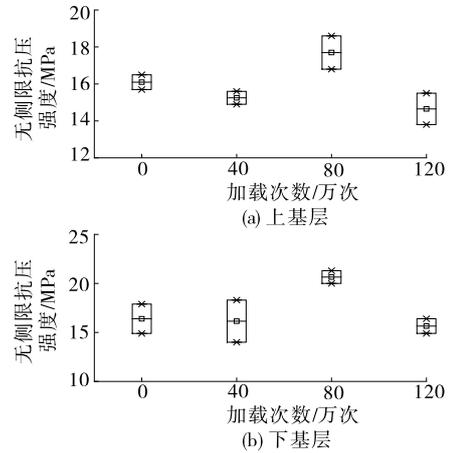


图 9 旧路基层芯样的无侧限抗压强度

4.2.3 劈裂强度试验

旧路基层芯样劈裂强度试验结果见表 7、图 10。从表 7 和图 10 可以看出:随着加载次数的增加,旧路基层芯样的劈裂强度出现一定波动。

表 7 旧路基层芯样劈裂强度试验结果

加载次数/ 万次	试验编号	劈裂强度/MPa			
		上基层		下基层	
		试验值	平均值	试验值	平均值
0	1	1.9		1.4	
	2	1.7	1.8	1.2	1.4
	3	1.7		1.5	
40	1	1.5		0.9	
	2	2.0	1.7	1.1	1.0
	3	1.6		0.9	
80	1	2.5		0.8	
	2	2.4	2.3	1.3	1.1
	3	1.9		1.1	
120	1	1.6		1.5	
	2	2.0	1.7	1.6	1.6
	3	1.6		1.8	

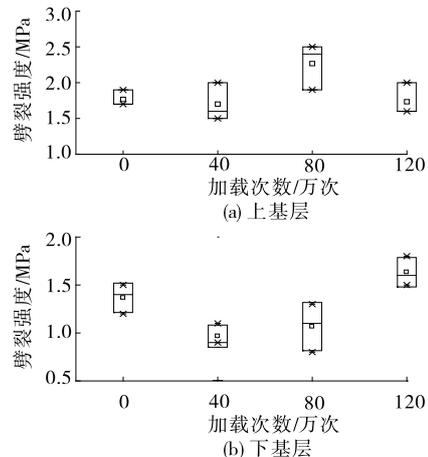


图 10 旧路基层芯样的劈裂强度

5 结论

在加速加载足尺试验 0~120 万次的条件下,对京沪高速公路淮江段改扩建工程旧路芯样的沥青面层进行重复荷载蠕变试验和半圆弯曲试验,对芯样的基层进行回弹模量试验、无侧限抗压强度试验、劈裂强度试验,得到以下结论:

(1) 随加载次数的增加,相对于加载前,旧路沥青面层材料的蠕变次数呈现下降趋势,蠕变次数指数则有增有减。相同加载次数下对加铺层、上面层、中面层、下面层分别取芯,同一结构层的半圆弯曲试验应变能释放速率波动明显。

(2) 随着加载次数的增加,旧路上基层的回弹模量总体呈现上升趋势,下基层的回弹模量总体处于稳定状态;旧路基层的无侧限抗压强度出现一定波动,加载 80 万次时无侧限抗压强度达到最高,120 万次时出现下降;旧路基层的劈裂强度出现一定波动。

(3) 经过 120 万次的加速加载足尺试验,该高速公路改扩建工程旧路沥青面层的高温性能与抗裂性能及基层的力学性能总体处于稳定状态,扩建后的试验车道在低荷载情况下能满足路用性能要求。

参考文献:

- [1] 廖朝华,王家强.多车道高速公路改扩建工程路面分车道设计探讨[J].中外公路,2009,29(2):241-246.
- [2] 雷春鸣.湖南省高速公路改扩建工程初探[J].公路与汽运,2013(1):211-213.

- [3] 刘鹏举.基于高速公路沥青加铺层结构设计方案的研究[J].科技资讯,2011(14):86.
- [4] 蔡宏亮.足尺沥青路面加速加载试验数据的采集与分析[J].北方交通,2015(12):77-79.
- [5] 黄民伟.基于路面加速加载系统的冷再生混合料生产配合比研究[J].公路与汽运,2019(1):81-84+87.
- [6] 田泽峰.MLS 足尺沥青路面加速加载试验[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
- [7] 陈少幸,张肖宁,孟书涛,等.基于 ALF 加速加载试验的沥青层疲劳损伤[J].公路交通科技,2012,29(1):18-22.
- [8] 田泽峰.高速公路沥青路面典型结构加速加载试验研究[J].北方交通,2014(11):57-61.
- [9] 周丹,马泽欣,刘黎萍,等.基于足尺加速加载试验的现役沥青路面疲劳特性研究[J].公路交通科技,2020,37(1):17-24.
- [10] 吕松涛,陈杰.基于加速加载试验的沥青混合料刚度衰变规律研究[J].公路交通科技,2016,33(5):1-6+13.
- [11] 赵永成.高抗剪强度级配碎石基层沥青路面加速加载试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2017,13(2):113-116.
- [12] 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.
- [13] 交通部公路科学研究院.公路工程无机结合料稳定材料试验规程:JTG E51—2009[S].北京:人民交通出版社,2009.

收稿日期:2022-06-09

(上接第 85 页)

- [12] American Society for Testing and Materials. Standard practice for determining the continuous grading temperatures and continuous grades for PG graded asphalt binders: ASTM D 7643—2010[S]. American Society for Testing and Materials, 2010.
- [13] LIN P, HUANG W D, TANG N P, et al. Understanding the low temperature properties of Terminal Blend hybrid asphalt through chemical and thermal analysis methods[J]. Construction and Building Materials, 2018, 169: 543-552.
- [14] 王岚,王子豪,李超.基于黏弹性理论的多聚磷酸改性

- 沥青低温性能[J].复合材料学报,2017,34(2):322-328.
- [15] 邢明亮,孙岳,谢超,等.基于灰熵法的 SMA-5 混合料级配组成范围研究[J].公路,2017,62(11):225-230.
- [16] JIANG W, YUAN D, TONG Z, et al. Aging effects on rheological properties of high viscosity modified asphalt[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering(English Edition), 2023, 10(2): 304-319.

收稿日期:2023-01-13