

紫外光及温度老化对冷拌冷铺乳化沥青混合料的性能影响评价

徐世法¹, 卢兆洋¹, 房 聪², 任小遇², 朱建东³

(1. 北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044; 2. 北京建筑大学北京市城市交通基础设施建设工程技术研究中心, 北京 100044; 3. 北京宏旭高科科技有限公司, 北京 102600)

摘 要 目的 研究紫外光及温度老化对冷拌冷铺乳化沥青混合料(CMA)高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性的影响。方法 基于CMA与热拌沥青混合料(HMA)的对比分析,在紫外光老化方面,通过Verhulst生物模型建立沥青混合料各项性能与紫外光老化时间的关系方程,提出紫外光老化速率评价指标,评价各项性能的紫外光老化速率;在温度老化方面,评价沥青混合料各项性能指标随老化时间的变化规律。结果 随着老化时间的延长,沥青混合料的高温稳定性得到提升,低温抗裂性和水稳定性降低;基于Verhulst生物模型的拟合方程相关系数 R^2 均在0.94以上。结论 CMA的低温抗裂性能受紫外光老化影响最大,水稳定性受温度老化影响最大;基于Verhulst生物模型的紫外老化拟合方程预测精度较高,可有效预测CMA在紫外光老化后的各项性能。

关键词 冷拌冷铺乳化沥青混合料;热拌沥青混合料;紫外光老化;温度老化

中图分类号 TU528.42;U414

文献标志码 A

Evaluation of the Influence of Temperature and UV Aging on the Properties of Cold Mix Emulsified Asphalt Mixture

XU Shifa¹, LU Zhaoyang¹, FANG Cong², REN Xiaoyu², ZHU Jiandong³

(1. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing, China, 100044; 2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing Urban Transportation Infrastructure Engineering Technology Research Center, Beijing, China, 100044; 3. Beijing Hongxu Gaoke Technology Co. Ltd., Beijing, China, 102600)

收稿日期:2021-07-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51978034);北京市自然科学基金项目-市教委联合基金资助项目(KZ202110016020);北京建筑大学未来城市设计高精尖创新中心重大科技项目(X18159);北京市属高校基本科研业务费专项基金项目(X20105);北京建筑大学研究生创新项目(PG2020041);北京建筑大学博士研究生科研能力提升项目(DG2021012)

作者简介:徐世法(1963—),男,教授,博士研究生导师,主要从事道路工程材料等方面研究。

Abstract: In order to explore the effects of UV aging and temperature aging on the stability of cold mixed asphalt mixture(CMA) in low and high temperature and water. This paper is based on the comparative analysis of CMA and hot mixed asphalt mixture(HMA). In the aspect of UV aging, the relationship equation between various properties of asphalt mixture and UV aging times is established through Verhulst biological model. The evaluation index of UV aging rate was put forward, and the UV aging rate of various properties is evaluated. In the aspect of temperature aging, the variation law of various performance indexes of asphalt mixture with aging time is evaluated. The results show that with the extension of aging time, the high-temperature stability of asphalt mixture is improved, the low-temperature crack resistance and water stability are reduced, and the correlation coefficient R^2 of the fitting equation based on Verhulst biological model is more than 0.94. The low-temperature crack resistance of CMA is the most affected by UV aging, and the water stability is the most affected by temperature aging. The UV aging fitting equation based on Verhulst biological model has high prediction accuracy, which can effectively predict the properties of CMA after UV aging.

Key words: cold mixed emulsified asphalt mixture; hot mixed asphalt; UV aging; temperature aging

冷拌冷铺乳化沥青混合料(Cold Mixed Asphalt, CMA)不受施工温度的影响,能够在常温下进行拌和、摊铺与碾压,适用于长时间储存和长距离运输,与热拌沥青混合料相比具有绿色节能环保等优点^[1-2]。CMA在使用过程中受紫外光、温度等外界因素的作用会产生老化现象,脆性增大,路用性能发生变化。因此,研究CMA的抗老化性能具有重要意义。在紫外光老化方面,谭忆秋等^[3-5]研究发现紫外老化与温度老化对沥青混合料各项性能的影响程度不同。丁彪等^[6]研究发现随着沥青混合料紫外老化时间的增加,其动稳定度有小幅提升,并且车辙深度越来越小。彭强等^[7]研究发现高弹改性沥青混合料在紫外老化后高温性能、低温性能及水稳定性略有降低。在温度老化方面,对于热拌沥青混合料来说,分为生产与施工过程中的短期老化及使用过程中长期老化^[8-9],对CMA来说其老化主要来自于使用过程中的长期老化。高诗龙等^[10]测试了橡胶沥青混合料在163℃下的水稳性、低温性能 and 高温性能。F. Y. Rad等^[11]通过比对不同温度下沥青混合料的老化情况,确定了95℃为沥青混合料长期老化的适宜温度。

纵观国内外对于沥青混合料抗老化性能的研究可以发现,相关研究工作主要集中于热拌沥青混合料(Hot Mixed Asphalt, HMA)^[12-15],对CMA的老化研究相对较少。基于此,笔者将从紫外光及温度老化对CMA的性能影响进行研究,并与HMA进行对比。通过建立Verhulst生物模型,建立沥青混合料各项性能与紫外光老化时间的关系方程,以便于预测紫外光老化后CMA的各项性能。

1 试验设计

为了评价紫外光及温度老化对CMA的性能影响并与HMA进行对比,笔者进行了紫外光老化及温度老化试验设计。

1.1 紫外光老化试验设计

笔者选取由课题组研制的沥青加速老化试验设备来模拟实际紫外光对沥青混合料的影响。将成型后的沥青混合料试件放入老化箱中,基于累计紫外辐射量相同原则,确定老化试验的紫外光强为141 W/m²,工作时间为24 h/d,试验温度为20℃,每日室内紫外辐射总量为0.338 W,约相当于北京地区室外辐射15 d。

1.2 温度老化试验设计

根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—201)中沥青混合料长期老化的试验方法^[16],将成型后的试件放入温度为85℃的烘箱中进行老化试验,以7 d 为一个周期测试一次沥青混合料的性能,共测试 63 d。

2 原材料及配合比设计

2.1 乳化沥青

笔者采用课题组自主研发的乳化沥青,

表 2 SBS 改性乳化沥青试验结果及技术要求

Table 2 Test results and technical requirements of SBS modified emulsified asphalt

技术指标	沥青质量 分数/%	破乳 速率	筛上剩余 量/%	电荷	恩格拉 黏度	动力黏度 (25℃)/cP	与矿料粘 附性、裹 覆试验
技术要求	60~65	慢	<0.3	阳离子	3~15	80~200	通过
试验结果	62	慢	0.021	阳离子	5.1	158.3	通过

技术指标	针入度/ 0.1 mm	软化 点/℃	延度(5℃)/ cm	储存稳定性 (1 d)/%	储存稳定性 (5 d)/%	韧性(25℃ 500 mm/ min)/ (N·m ⁻¹)	黏韧性(25℃ 500 mm/ min)/ (N·m ⁻¹)
技术要求	40~90	>60	>30	≤1	≤5	≥20	≥25
试验结果	67	62.2	48	0.18	1.32	28	39

2.2 矿料与填料

矿料为石灰岩,填料为 P·O42.5 水泥,技术指标满足《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)的要求^[17]。

2.3 配合比设计

2.3.1 级配设计

试验采用 AC-13 型沥青混合料,级配曲线如图 1 所示。

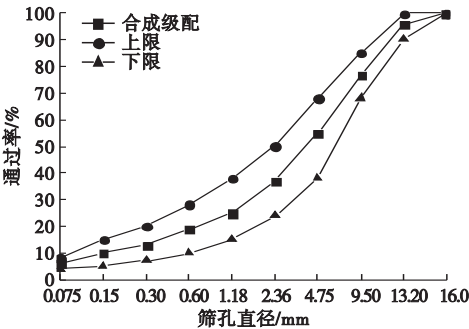


图 1 AC-13 型沥青混合料级配曲线图

Fig.1 Gradation curves of AC-13 asphalt mixture

原样沥青采用 SBS 改性沥青,各项技术指标检测结果见表 1、表 2。

表 1 SBS 改性沥青试验结果及技术要求

Table 1 Test results and technical requirements of SBS modified asphalt

技术指标	针入度/ 0.1 mm	软化点/ ℃	延度(5℃)/ cm
技术要求	40~90	>60	>30
试验结果	73	66	50

2.3.2 各组分掺量设计

①根据经验制作 5 组乳化沥青掺量分别为 7%、7.5%、8%、8.5% 和 9% 的 CMA 试件,通过测定养生后 CMA 的力学体积指标确定最佳乳化沥青掺量为 8.0%^[18]。

②制作水泥掺量为 0%、0.5%、1.0%、1.5% 和 2% 的马歇尔试件,对不同水泥掺量的马歇尔试件进行马歇尔稳定度和路用性能检测,最终确定水泥最佳掺量为 1%^[18]。

③采用试拌法预估外掺水用量。经前期试验经验,分别试拌 1.0%、1.5%、2.0%、2.5% 和 3% 五种外掺水掺量的乳化沥青混合料,并观察拌和状态,最终确定最佳外掺水掺量为 2.0%^[19]。

④热拌沥青混合料采用制备乳化沥青的 SBS 改性沥青作为结合料,级配和 CMA 相同,经过试验确定沥青掺量为 5%。

2.3.3 性能验证

按上述混合料组成成型好的 CMA 试件并放入 90℃ 的烘箱内养生 24 h,测得 HMA

和养生后的 CMA 性能指标见表 3。表中数据表明,混合料满足相关技术要求。

表 3 沥青混合料试验结果

Table 3 Test results of asphalt mixture

技术指标	稳定度/kN	残留稳定度/%	冻融劈裂比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	最大弯拉应变/10 ⁻⁶
技术要求	≥8.0	≥85	≥80	≥3 000	≥2 500
CMA 实测值	9.1	93	90	11 685	2 854
HMA 实测值	9.7	94	90	4 128	3 560

3 紫外光老化对 CMA 及 HMA 性能影响评价

3.1 紫外光老化对 CMA 及 HMA 各项路用性能影响

笔者分别采用高温车辙试验、低温小梁弯曲试验和冻融劈裂试验测试紫外老化后 CMA 和 HMA 的动稳定度、最大弯拉应变以及冻融劈裂强度比,试验结果见表 4。由表 4

可以看出,紫外光老化 63 d 后,HMA 的动稳定度提高了 11.1%、最大弯拉应变降低了 30.7%、冻融劈裂强度比降低了 14.9%,CMA 的动稳定度提高了 11.2%、最大弯拉应变降低了 56.8%、冻融劈裂强度比降低了 15.7%。CMA 的最大弯拉应变受紫外光老化影响较 HMA 更大,两者的冻融劈裂强度比和动稳定度变化比例相近。

表 4 紫外老化后两种沥青混合料各项路用性能

Table 4 Road performance of the two asphalt mixtures after ultraviolet aging

老化时间/d	HMA			CMA		
	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	最大弯拉应变/10 ⁻⁶	冻融劈裂强度比/%	动稳定度/(次·mm ⁻¹)	最大弯拉应变/10 ⁻⁶	冻融劈裂强度比/%
0	4 128	3 560	90	11 685	2 854	90
7	4 291	3 054	88	12 146	2 403	85
14	4 378	2 900	86	12 393	2 013	83
21	4 443	2 803	84	12 543	1 836	80
28	4 510	2 756	81	12 663	1 536	77
35	4 565	2 678	79	12 762	1 321	76
42	4 610	2 536	78	12 833	1 236	76
49	4 645	2 432	77	12 895	1 235	76
56	4 663	2 331	77	12 936	1 234	76
63	4 672	2 330	77	12 975	1 234	76

3.2 老化混合料 Verhulst 模型的建立

生物模型 Verhurst 的基本思想是生物个体的数量呈指数增长,生长逐渐减慢并最终稳定到一个固定值。该模型受环境限制,主要用于描述具有饱和态性质的物理发展过程^[20]。

沥青混合料紫外光老化过程中,随着老

化时间的增加,各项性能变化速率由快至慢,相同老化时间内性能变化的幅度越来越小,最后性能变化速率趋于 0。此变化过程与 Verhulst 生物模型极为相似,具有生物饱和状态特征,因此笔者采用 Verhulst 生物模型描述紫外光老化后 CMA 及 HMA 的性能衰变,并通过相关系数 R² 的值验证各项路用性

能实测值与 Verhulst 生物模型值的拟合度^[19],计算式如下:

$$x(t)=\frac{UAI\times x_0}{1-e^{\alpha t}(1-UAI)}.$$

(1)

当时间趋于无穷大时,式(1)转化为式(2):

$$VAI_t=\frac{UAI}{1-e^{\alpha t}(1-UAI)}.$$

(2)

式中: $x(t)$ 为紫外光辐照 t 天后,沥青混合料的各性能指标值; x_0 为未进行紫外光辐照的沥青混合料各性能指标初始值; UAI 为沥青

混合料紫外光老化稳定后的路用性能指标值与初始值的比; VAI_t 为紫外光辐照 t 天后,沥青混合料各性能指标值与初始值的比。

由表 4 可知,CMA 和 HMA 在 49~63 d 过程中,动稳定度、最大弯拉应变、冻融劈裂强度变化很小,甚至不变。因此计算 UAI 值时,沥青混合料紫外光老化稳定后的路用性能指标值采取第 63 天的值。

通过 Verhulst 生物模型分别对紫外光老化后 CMA 和 HMA 的动稳定度、最大弯拉应变和冻融劈裂强度比进行拟合,结果见表 5。

表 5 两种沥青混合料各项路用性能 Verhulst 生物模型

Table 5 Verhulst biological model of road performance of the two asphalt mixtures						
混合料性能	混合料类型	UAI	α	混合料性能非线性模型	VAI_t	R^2
动稳定度	HMA	1.111	-0.070	$x(t)=\frac{4\,586.208}{1-e^{-0.070t}(1-1.111)}$	$VAI_t=\frac{1.111}{1-e^{-0.070t}(1-1.111)}$	0.993
	CMA	1.112	-0.070	$x(t)=\frac{12\,993.72}{1-e^{-0.070t}(1-1.112)}$	$VAI_t=\frac{1.112}{1-e^{-0.070t}(1-1.112)}$	0.986
最大弯拉应变	HMA	0.654	-0.037	$x(t)=\frac{2\,328.240\,0}{1-e^{-0.037t}(1-0.654)}$	$VAI_t=\frac{0.654}{1-e^{-0.037t}(1-0.654)}$	0.955
	CMA	0.432	-0.035	$x(t)=\frac{1\,232.928\,0}{1-e^{-0.035t}(1-0.432)}$	$VAI_t=\frac{0.432}{1-e^{-0.035t}(1-0.432)}$	0.944
冻融劈裂强度比	HMA	0.851	-0.038	$x(t)=\frac{76.760\,2}{1-e^{-0.038t}(1-0.851)}$	$VAI_t=\frac{0.851}{1-e^{-0.038t}(1-0.851)}$	0.941
	CMA	0.843	-0.058	$x(t)=\frac{75.617\,1}{1-e^{-0.058t}(1-0.843)}$	$VAI_t=\frac{0.843}{1-e^{-0.058t}(1-0.843)}$	0.977

从表 5 中可以看出,相关系数 R^2 最低值为 0.941,最高值为 0.993,CMA 和 HMA 的各项路用性能 Verhulst 生物模型值与实测值拟合度较高,说明能够利用该模型准确预测紫外光老化的影响。根据模型和实测值绘制两种混合料老化后不同性能随老化时间变化曲线如图 2~图 4 所示。

由图 2~图 4 可以看出,HMA 在紫外光老化后高温稳定性提升约 10%,而低温抗裂性和水稳定性分别残留约 65% 及 85%,CMA 在紫外光老化后高温稳定性提升约 10%,而低温抗裂性和水稳定性分别残留约 43% 及 84%。可以看出,CMA 的低温抗裂

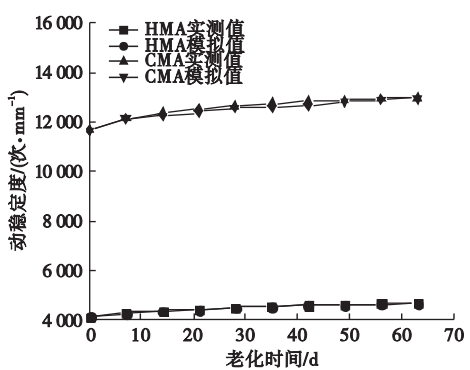


图 2 两种混合料老化后动稳定度随老化时间的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of dynamic stability with aging time after aging of two mixtures

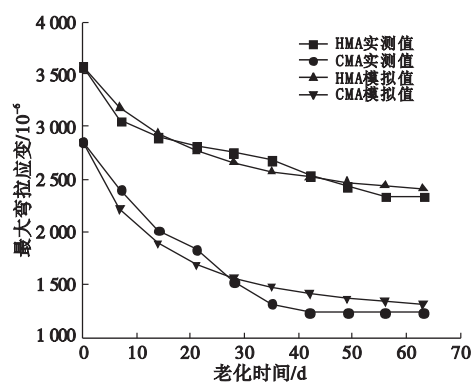


图3 两种混合料老化后最大弯拉应变随老化时间的变化曲线

Fig.3 Variation curves of residual maximum bending tensile strain with aging time after aging of two mixtures

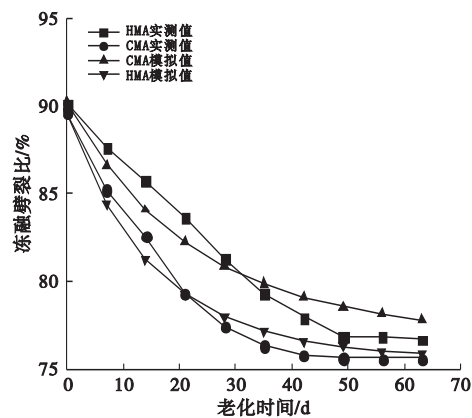


图4 两种混合料老化后冻融劈裂强度比随老化时间的变化曲线

Fig.4 Variation curves of freeze-thaw splitting strength ratio with aging time after aging of two mixtures

性变化较 HMA 更大,两者的水稳定性和高温稳定性变化曲线相近。

3.3 沥青混合料各项性能紫外光老化速率评价

3.3.1 紫外光老化速率评价指标的提出

笔者提出利用紫外光老化速率来评价沥青混合料各项性能受紫外光老化的影响程度。通过对式(2)求关于紫外光辐照天数 t 的导数,可得到紫外光辐照天数 t 与沥青混合料各性能紫外老化速率 x 的函数关系:

$$x'(t) = \frac{a \times b \times e^{at}}{(1 + e^{at}b)^2}.$$
 (3)

式中: $a = \alpha UAI \times x_0, b = UAI - 1$ 。

3.3.2 沥青混合料各项性能紫外光老化速率

根据式(3)求得沥青混合料各项性能随紫外光老化时间的变化率方程参数值,结果见表6。基于各性能变化率方程,对 CMA 与 HMA 的高温稳定性、低温抗裂性及水稳定性进行拟合,并绘制老化天数与沥青混合料各项性能紫外光老化速率的关系曲线(见图5)。由图5可以看出, $t = 0$ 时,CMA 与 HMA 的低温抗裂性紫外光老化速率初始值最大,并且 $t = 0$ 时,CMA 和 HMA 的水稳定性紫外光老化速率初始值均为0。由此可知,紫外光老化对两种不同沥青混合料的低温抗裂性影响显著,对水稳定性几乎没有影响。由图还可以看出,CMA 与 HMA 的各项性能紫外光老化速率曲线最终均收敛于0,

表6 沥青混合料各项性能紫外光老化变化率参数值

Table 6 UV aging rate parameter values of various mixture performance

混合料性能	混合料类型	a	b	公式
高温稳定性	HMA	-321.035	0.111	$x'(t) = \frac{-35.635e^{-0.070t}}{[1 + 0.111e^{-0.070t}]^2}$
	CMA	-909.560	0.112	$x'(t) = \frac{-101.871e^{-0.070t}}{[1 + 0.112e^{-0.070t}]^2}$
低温抗裂性	HMA	-86.144	-0.346	$x'(t) = \frac{29.806e^{-0.037t}}{[1 - 0.346e^{-0.037t}]^2}$
	CMA	-43.152	-0.568	$x'(t) = \frac{24.511e^{-0.035t}}{[1 - 0.568e^{-0.035t}]^2}$
水稳定性	HMA	-2.916	-0.149	$x'(t) = \frac{0.434e^{-0.038t}}{[1 - 0.149e^{-0.038t}]^2}$
	CMA	-4.386	-0.157	$x'(t) = \frac{0.689e^{-0.058t}}{[1 - 0.157e^{-0.058t}]^2}$

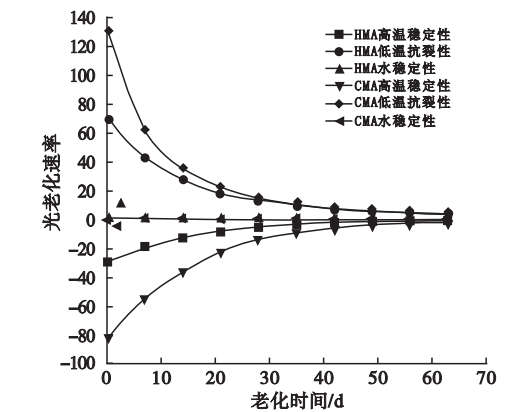


图 5 沥青混合料三项性能紫外光老化速率对比

Fig. 5 Comparison of light aging rate of three properties of asphalt mixture

因此紫外光老化对两种不同沥青混合料的影响均随时间增长而降低,并且最终各项性能紫外光老化速率趋近于 0。

表 7 温度老化对沥青混合料各项路用性能的影响

老化时间/d	HMA			CMA		
	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	最大弯拉 应变/10 ⁻⁶	冻融劈裂 强度比/%	动稳定度/ (次·mm ⁻¹)	最大弯拉 应变/10 ⁻⁶	冻融劈裂 强度比/%
0	4 128	3 560	90	11 685	2 854	90
7	4 422	3 216	87	12 458	2 675	85
14	4 563	2 856	84	13 578	2 536	80
21	4 541	2 703	80	13 546	2 456	71
28	4 515	2 623	74	13 568	2 365	63
35	4 499	2 512	71	13 524	2 275	56
42	4 493	2 434	69	13 521	2 184	50
49	4 455	2 356	65	13 564	2 098	47
56	4 375	2 268	61	13 265	1 999	37
63	4 308	2 179	59	13 198	1 878	33

4.2 沥青混合料温度老化性能影响分析

在研究多变量课题中,变量个数的过多会增加课题的复杂性,同时多个变量会存在一定的相关性,导致变量之间反应该课题的内部信息重叠。数理统计分析方法中的主成分分析法的本质是利用较少的主成分变量揭示较多个变量之间影响程度,这种多元统计方法不仅能够保证研究变量之间的复杂性与非相关性,而且能够尽可能多的保存原始变量信息^[21]。

4 温度老化对 CMA 及 HMA 性能的影响评价

4.1 温度老化对沥青混合料各项路用性能的影响

笔者分别采用车辙试验、低温小梁弯曲试验和冻融劈裂试验评价温度老化后 CMA 和 HMA 的各项性能,结果见表 7。由表 7 可以看出,两者的冻融劈裂强度比和最大弯拉应变随老化时间呈递减趋势,CMA 的冻融劈裂强度比降低速率较 HMA 更大,HMA 的最大弯拉应变降低速率较 CMA 更大。两者的高温性稳定性随老化时间的增加先增大后减小,老化 63 d 后,HMA 的高温性稳定性提升了 4.4%,CMA 的高温性稳定性提升了 12.9%。

沥青混合料随着温度老化时间的延长,其老化程度逐渐增大,各项路用性能均会明显变化,但不同性能对温度老化程度的敏感性不同且彼此之间存在一定的相关性,为此笔者基于 spss 数理统计软件,首先对表 7 中的 CMA 动稳定度、最大弯拉应变和冻融劈裂强度比进行标准化处理,而后利用因子分析模块将标准化处理后的数据作为变量进行主成分分析,以此得到受温度老化影响最大的混合料性能,结果见表 8。表中合计值大

于1,表明该主成分解释力度强;方差的贡献率表示总方差中属于该主成分的比例,贡献率越大,影响越大。

表8 温度老化对沥青混合料各项路用性能的影响

Table 8 Influence of temperature aging on road performance of asphalt mixture		
成分	方差总计	方差的贡献率/%
高温性能	0.008	0.3
低温性能	0.595	19.8
水稳定性	2.397	79.9

由表8可以看出,CMA 高温性能和低温性能的合计值都小于1,表明该主成分的解释力度较弱,受温度老化影响小。CMA 水稳定性的合计值大于1,说明该主成分的解释力度较强,受温度老化影响大,表明温度老化对CMA 的水稳定性影响最大。

5 结 论

(1)紫外光老化对沥青混合料低温抗裂性影响最大,对水稳定性影响度最小,CMA 的低温抗裂性受紫外光老化影响较HMA 更大,两者的冻融劈裂强度比和动稳定度变化比例相近。

(2)基于 Verhulst 生物模型建立了CMA 和HMA 紫外老化后路用性能预测方程,拟合的相关系数 R^2 均在0.94以上,预测精度较高,可利用该模型预测紫外光老化的影响。

(3)温度老化试验结果表明,CMA 和HMA 的水稳定性和低温抗裂性均随老化时间的增加而降低,高温稳定性随老化时间延长先增大后减小;HMA 的低温抗裂性受温度老化影响大于CMA,CMA 的高温稳定性和水稳定性受温度老化影响大于HMA,且相较高温性能和低温性能,CMA 的水稳定性受温度老化的影响较大。

参考文献

[1] 李思童,黄玉颖,蔡硕果,等. AC-10 冷拌冷铺乳化沥青混合料路用性能评价[J]. 石油沥青,2018,32(3):12-16.

(LI Sitong, HUANG Yuying, CAI Shuoguo, et al. Road performance evaluation of AC-10 cold mix emulsified asphalt mixture [J]. Petroleum asphalt,2018,32(3):12-16.)

[2] 徐世法,黄玉颖,蔡硕果,等. 冷拌冷铺沥青混合料技术进展[J]. 筑路机械与施工机械化,2018,35(2):34-36.

(XU Shifa, HUANG Yuying, CAI Shuoguo, et al. Progress of technologies for cold mix asphalt [J]. Road machinery & construction mechanization,2018,35(2):34-36.)

[3] 谭忆秋,冯中良,周兴业,等. 沥青抗紫外老化评价方法的研究[EB/OL]. [2003-10-26]. Http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/200310-31.

(TAN Yiqiu, FENG Zhongliang, ZHOU Xingye, et al. Study on the evaluation method of anti UV aging of asphalt [EB/OL]. [2003-10-26]. Http://www. paper. edu. cn/releasepaper/content/200310-31.)

[4] 冯中良. 沥青及沥青混合料抗紫外老化性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.

(FENG Zhongliang. Study on anti ultraviolet aging performance of asphalt and asphalt mixture [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2004.)

[5] LI Huixia, WANG Jian, LI Fengxia. Research progress on ultraviolet aging of asphalt and asphalt mixtures [J]. Applied mechanics and materials,2012(178/181):1537-1540.

[6] 丁彪,柯文豪,左兴,等. 紫外老化对沥青及沥青混合料高低温性能的影响[J]. 新型建筑材料,2017,44(5):9-12.

(DING Biao, KE Wenhao, ZUO Xing, et al. Effect of ultraviolet aging on high and low temperature performance of asphalt and asphalt mixture [J]. New building materials,2017,44(5):9-12.)

[7] 彭强,郝增恒,谭忆秋. 紫外老化对高弹改性沥青及混合料性能影响分析[J]. 公路交通技术,2020,36(5):32-37.

(PENG Qiang, HAO Zengheng, TAN Yiqiu. Influence analysis of UV-aging on the properties of high elastic modified asphalt and mixture [J]. Technology of highway and transport,2020,36(5):32-37.)

[8] 李璐,刘攀,盛兴跃,等. 热氧老化对高韧性环氧沥青及其混合料性能的影响[J]. 科学技术与工程,2019,19(12):339-343.

(LI Lu, LIU Pan, SHENG Xingyue, et al. Effect of thermal oxygen aging on performance of high toughness epoxy asphalt and its mixture [J]. Science technology and engineering,2019,19(12):339-343.)

[9] 张文刚,师郡. 沥青混合料室内加速热氧老化特性与预估[J]. 科学技术与工程,2017,17(24):279-282.

(ZHANG Wengang, SHI Jun. Aging characteristic and estimate of aged asphalt mixtures [J]. Science technology and engineering,2017,17

- (24):279-282.)
- [10] 高诗龙,洪盛祥. 基于 Superpave 设计方法的橡胶沥青混合料老化特征研究[J]. 中外公路,2016,36(6):260-263.
(GAO Shilong, HONG Shengxiang. Study on aging characteristics of rubber asphalt mixture based on Superpave design method [J]. Journal of China & foreign highway, 2016, 36(6):260-263.)
- [11] RAD F Y, ELWARDANY M D, CASTORENA C, et al. Investigation of proper long-term laboratory aging temperature for performance testing of asphalt concrete [J]. Construction and building materials, 2017, 147(30):616-629.
- [12] 陈静云,邱隆亮. SBS 改性沥青老化与再生机理的红外光谱[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(5):859-864.
(CHEN Jingyun, QIU Longliang. Analysis of the mechanism of aging and regeneration of SBS modified asphalt based on the infrared [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(5):859-864.)
- [13] 季节,郭晨伟,张奥,等. 紫外老化对废食用植物油再生沥青性能的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(2):309-314.
(JI Jie, GUO Chenwei, ZHANG Ao, et al. Study on effect of ultraviolet aging on the properties of waste vegetable oil recycled asphalt [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35(2):309-314.)
- [14] WU Shaopeng, YE Yong, LI Yuanyuan, et al. The effect of UV irradiation on the chemical structure, mechanical and self-healing properties of asphalt mixture [J]. Materials, 2019, 12(15):2424.
- [15] 梁远禄,彩雷洲,赵立东. 紫外老化对树脂沥青混合料性能影响[J]. 公路, 2019, 64(6):252-255.
(LIANG Yuanlu, CAI Leizhou, ZHAO Lidong. Influence of ultraviolet aging on performance of resin asphalt mixture [J]. Highway, 2019, 64(6):252-255.)
- [16] 中华人民共和国交通部. 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.
(Ministry of Communications of the People's Republic of China. Test specification for asphalt and asphalt mixture in Highway Engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2011.)
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路沥青路面施工技术规范:JTG F40—2004 [S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
(Ministry of communications of the people's Republic of China. Technical specification for highway asphalt pavement construction: JTG F40—2004 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2004.)
- [18] 胡超峰,徐世法,祝闯,等. OGFC-13 冷拌冷铺乳沥青混合料路用性能评价[J]. 石油沥青, 2019, 33(1):38-44.
(HU Chaofeng, XU Shifa, ZHU Chuang, et al. Road performance evaluation of OGFC-13 cold mix and cold application emulsified asphalt mixture [J]. Petroleum asphalt, 2019, 33(1):38-44.)
- [19] 李思童. 冷拌冷铺沥青混合料长期路用性能研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2019.
(LI Sitong. Evaluation on long-term performance of cold mixed asphalt pavement [D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2019.)
- [20] 童申家,谢祥兵,赵大勇,等. 紫外光老化后沥青混合料路用性能非线性预测[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1):105-110.
(TONG Shenjia, XIE Xiangbing, ZHAO Dayong, et al. Nonlinear prediction of road performance of asphalt mixture after ultraviolet aging [J]. Journal of building materials, 2016, 19(1):105-110.)
- [21] 苏键,陈军,何洁. 主成分分析法及其应用[J]. 轻工科技, 2012, 28(9):12-13.
(SU Jian, CHEN Jun, HE Jie. Principal component analysis and its application [J]. Light industry science and technology, 2012, 28(9):12-13.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)