

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201910017



彩色沥青混合料紫外线老化 影响因素的灰色关联分析

包惠明, 迟恩涛, 叶腾飞

(桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 使用基质沥青制备空隙率分别为 20%, 23%, 25% 的大空隙母体马歇尔试件, 并在母体表面涂上不同二氧化钛掺量改性的彩色乳化沥青. 将颜色、空隙率、二氧化钛掺量和紫外线照射时间作为影响因素, 将紫外线照射后试件的马歇尔稳定度作为评价指标, 采用灰色关联分析理论, 对彩色沥青混合料紫外线老化的影响因素进行研究. 结果表明: 空隙率越大, 紫外线对彩色沥青混合料的老化影响越明显; 二氧化钛能提高彩色沥青混合料抗紫外线老化性能, 当二氧化钛掺量为 3.0% 时, 彩色沥青混合料的抗紫外线老化性能最佳; 4 种影响因素按照重要程度排序为紫外线照射时间 > 二氧化钛掺量 > 空隙率 > 颜色, 且灰色关联度均大于 0.600, 表明这 4 种因素均对彩色沥青混合料的抗紫外线老化性能有重要影响.

关键词: 紫外线老化; 彩色沥青混合料; 空隙率; 马歇尔稳定度; 灰色关联度

中图分类号: U 414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)04-0466-08

Grey Correlation Analysis of Factors Affecting Ultraviolet Aging of Colored Asphalt Mixture

BAO Huiming, CHI Entao, YE Tengfei

(College of Civil and Construction Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: Matrix asphalt was used to prepare large void matrix Marshall test pieces with void ratios of 20%, 23% and 25%. The surface of the matrix was coated with different TiO₂ content modified colored emulsified asphalt. Color, void ratio, TiO₂ content and ultraviolet irradiation time were taken as the influence factors, Marshall stability of test piece after ultraviolet irradiation was used as the evaluation index, and the grey correlation analysis theory was introduced to study the influence factors of ultraviolet aging of colored asphalt mixture. The results show that the higher the void ratio, the more obvious the aging effect of ultraviolet on colored asphalt mixture. TiO₂ can improve the ultraviolet aging resistance of colored asphalt mixture, when TiO₂ content is 3.0%, the colored asphalt mixture has the best anti-ultraviolet aging property. The four influence factors were ranked according to their importance: ultraviolet irradiation time > TiO₂ content > void ratio > color, and the gray correlation degree was greater than 0.600, indicating that these four factors have an important influence on the anti-ultraviolet aging properties of the colored asphalt mixture.

Keywords: ultraviolet aging; colored asphalt mixture; void ratio; Marshall stability; grey correlation

凭借良好的排水性能和色彩丰富的特点,彩色排水沥青路面被逐渐地应用于城市道路中. 为了满足排水功能,彩色排水沥青路面通常具有较大的空隙率,但这更容易使彩色排水沥青路面受外界因素的影

收稿日期: 2019-10-16

通信作者: 包惠明(1963-),男,教授,博士,主要从事边坡工程、道路工程的研究. E-mail: bhming@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51768016)

响而老化^[1],尤其是太阳光中的紫外线. 目前,学者已开始关注彩色沥青的抗紫外线老化性能. 何文华等^[2]根据紫外光老化前后马歇尔稳定度和流值的变化,评价沥青混合料的高温稳定性和抗紫外光老化能力. 二氧化钛(TiO₂)作为一种具有高透明性、高分散性、高折光性和高光活性的阻隔紫外线材料,引起了学者的关注. 孙式霜等^[3]以纳米 TiO₂ 粉体作为紫外线吸收抗老化剂,证实其对紫外线有强吸收作用,能够有效地增强沥青抗紫外线老化的性能. 郑木莲等^[4]为了提高沥青路面夏季高温稳定性,缓解城市热岛效应,将一种新型热反射涂层涂布于沥青路面,研究表明白色热反射涂层的降温效果优于灰色涂层. 在此基础之上,张争奇等^[5]研发一种彩色反射式沥青路面涂层,并测试涂层对路用性能的影响,最终从经济效果和降温效果的角度考虑,推荐红色、绿色及黄色的填料. Zhang 等^[6]采用薄膜烘箱试验、压力老化试验和紫外辐射容器分别模拟粘结剂的短期、长期热氧化和光氧化老化,与空白试样相比,热致变色沥青在 3 种老化模式下均表现出较好的抗老化性能,加入质量分数为 6% 的红色热致变色粉的沥青在粘结剂中表现出最佳的抗老化性能. Zheng 等^[7]在高原地区研究无机纳米 TiO₂ 高弹性沥青混合料的性能,证实纳米 TiO₂ 粉末的加入可以有效地提高高弹性沥青的抗紫外线老化性能.

目前,大多数研究都是针对彩色沥青紫外线老化的一个影响因素或独立的几个影响因素进行分析,缺乏综合性,且关于彩色沥青的颜色、二氧化钛掺量、紫外线照射时间和空隙率等影响因素的研究较多^[8-10]. 灰色关联理论^[11]是根据完全已知、完全未知或部分已知的信息,将系统分为白色、黑色或灰色系统,运用数学分析的方法解决数据匮乏情况下的系统问题,可避免样本量及计算量较大的问题^[12-13]. 基于此,本文采用灰色关联分析法,对颜色、空隙率、二氧化钛掺量和紫外线照射时间等彩色沥青混合料紫外线老化的影响因素进行分析.

1 灰色关联分析法

灰色关联理论是一种新型工程系统理论^[14],其主要研究对象是信息不完全的不确定系统,主要包括元素信息不完全、结构信息不完全、边界信息不完全和运行行为不完全等 4 种情况. 灰色关联理论运用少与多的辩证统一,局部与整体的转化,对少量已知信息进行筛选、加工、延伸和扩展,深化对系统的认识,从众多因素中提炼系统的主要影响因素.

灰色关联分析法有以下 6 个步骤.

步骤 1 参考数列和比较数列的确定. 设参考数列为 $X_0 = \{X_0(t) | t = 1, 2, 3, \dots, N\}$, 分析数列为 $X_i = \{X_i(t) | t = 1, 2, 3, \dots, N\}, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

步骤 2 参数初始化. 为方便分析,并保证影响因素的等效性和同序性,将参数进行无量纲处理,常用的无量纲处理方法有初值化处理、均值化处理、中心化处理、极小化处理、极大化处理和极差化处理^[15]. 文中采用中心化处理方法,即

$$Y_i(t) = [X_i(t) - \bar{X}] / \sigma_i. \tag{1}$$

式(1)中: \bar{X} 为 X 样本的平均值; σ_i 为样本的均方差.

设中心化处理后的参考数列 $Y_0 = \{Y_0(t) | t = 1, 2, 3, \dots, N\}$; 分析数列为 $Y_i = \{Y_i(t) | t = 1, 2, 3, \dots, N\}, i = 1, 2, 3, \dots, n$.

步骤 3 计算绝对差. 各参考数列与分析数列在各点的绝对差为

$$\Delta_i(t) = |Y_0(t) - Y_i(t)|. \tag{2}$$

步骤 4 计算关联系数. Y_0 与 Y_i 的关联系数为

$$\xi_i(t) = \frac{\min_i \min_t |Y_0(t) - Y_i(t)| + \rho \max_i \max_t |Y_0(t) - Y_i(t)|}{\Delta_i(t) + \rho \max_i \max_t |Y_0(t) - Y_i(t)|}. \tag{3}$$

式(3)中: $\min_i \min_t |Y_0(t) - Y_i(t)|, \max_i \max_t |Y_0(t) - Y_i(t)|$ 分别为两极最小差和两极最大差; ρ 为分辨系数,取值范围为 0~1,一般取 0.5.

步骤 5 计算关联度. Y_0 与 Y_i 的关联度 r_i 为

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \xi_i(t). \tag{4}$$

步骤 6 确定主要影响因素. Y_i 与 Y_0 的关联度 r_i 越大,表明 Y_i 与 Y_0 的发展趋势越接近, Y_i 对 Y_0 的影响越大.按照关联度 r_i 对影响因素进行排序,最终确定主要影响因素.

2 试验材料与设计

2.1 试验材料

1) 基质沥青.采用“东海牌”70#A 级沥青(中国石化股份有限公司(茂名)),其基本技术指标,如表 1 所示.

表 1 70#A 级沥青的基本技术指标
Tab. 1 Basic technical indexes of 70#A asphalt

技术指标	文献[16]要求	测试结果	技术指标	文献[16]要求	测试结果
25 ℃,0.1 mm 针入度	60~80	65	软化点/℃	≥46.0	47.8
针入度指标	-1.50±1.00	-1.12	闪点/℃	≥260	298
延度(15 ℃)/cm	≥100.00	104.55	溶解度/%	≥99.50	≥99.50

2) 彩色乳化沥青.采用彩色乳化沥青(北京市中远海运国际贸易有限公司),其基本技术指标,如表 2 所示.

表 2 彩色乳化沥青基本技术指标
Tab. 2 Basic technical indexes of colored emulsified asphalt

技术指标	文献[17]要求	测试结果	技术指标	文献[17]要求	测试结果
颜色	—	土红色/草绿色	沥青固含量/%	>55	62
存储稳定性(1 d)	<1.0	0.3	25 ℃,0.1 mm 针入度	40~100	88
存储稳定性(5 d)	<5.0	3.7	延度(15 ℃)/cm	>100	>100
离子电荷	阳离子	阳离子	延度(5 ℃)/cm	>20	40
破乳速度	慢裂快凝	慢裂快凝	软化点/℃	>60	65
筛余残留物比例/%	<0.1	0.06			

3) 纳米 TiO_2 .采用锐钛矿型纳米 TiO_2 (河北省南宫市鑫盾合金焊材喷涂有限公司),其为白色粉末状,质地柔软,无嗅无味,遮盖力和着色力强,熔点为 1 560~1 580 ℃,不溶于水、稀无机酸、有机溶剂和油,微溶于碱,溶于浓硫酸.

4) 集料.采用广西某采石场压碎值较高、针片状较低、表面纹理良好的石灰岩作为集料.石灰岩集料的筛分结果,如表 3 所示.表 3 中: l 为粒径; ρ_a 为表观相对密度; ρ_v 为毛体积相对密度; η_w 为吸水率; η_m 为压碎值; δ_l 为针片状集料的质量分数.通过水洗法测定粗集料中小于 0.075 mm 的颗粒质量分数为 0.48%,满足文献[17]不大于 1.0%的要求.

表 3 石灰岩集料的筛分结果
Tab. 3 Screening results of limestone aggregates

l/mm	$\rho_a/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\rho_v/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\eta_w/\%$	$\eta_m/\%$	$\delta_l/\%$
13.200	2.726	2.715	0.42	19.4	6.0
9.500	2.704	2.694	0.48	18.6	8.2
2.360	2.715	2.709	0.69	—	—
1.180	2.723	—	—	—	—
0.600	2.721	—	—	—	—
0.300	2.692	—	—	—	—
0.150	2.728	—	—	—	—
0.075	2.722	—	—	—	—
文献[17]要求	≥2.600	≥2.500	≤3.00	≤28.0	≤18.0

5) 紫外线老化设备.作为试验主要光源的紫外线灯泡采用 E27 型灯头的紫外线老化灯泡(德国欧司朗集团).紫外线灯泡的技术指标:功率为 300 W;电压为 230 V;紫外线波长为 365~400 nm;长度为 185 mm.

2.2 试验设计

在分析空隙率对紫外线老化性能的影响时,先根据主骨料空隙填充(CAVF)法^[18-21]设计空隙率分别为 20%,23%,25%的母体沥青混合料,分别记作级配 1~3. 矿料级配组成,如表 4 所示. 表 4 中: η 为矿料的通过率,表示各级粒径颗粒的分配情况;孔径 1~9 分别表示筛孔孔径为 16. 000,13. 200,9. 500,2. 360,1. 180,0. 600,0. 300,0. 150,0. 075 mm.

表 4 矿料级配组成
Tab. 4 Aggregate gradation composition

级配	$\eta/\%$								
	孔径 1	孔径 2	孔径 3	孔径 4	孔径 5	孔径 6	孔径 7	孔径 8	孔径 9
级配 1	—	100.0	15.7	11.9	9.3	6.7	3.8	2.7	2.0
级配 2	—	100.0	11.7	8.1	6.1	—	4.1	2.9	2.4
级配 3	100.0	68.9	8.7	6.7	5.3	3.9	—	3.3	2.8

在最佳沥青用量的情况下,制备 3 种符合马歇尔试验指标级配的母体试件. 级配 1~3 的实测空隙率分别为 19. 62%,22. 68%,24. 62%. 3 种级配的母体马歇尔试件,如图 1 所示.

3 紫外线老化影响因素分析

3.1 空隙率和紫外线照射时间

将母体马歇尔试件在紫外线灯下分别照射 24,48,72 h,制备经过紫外线老化的试件. 根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[16],取未经紫外线老化和经过紫外线老化的试件进行沥青混合料马歇尔稳定度试验. 将试件置于 (60 ± 1) ℃的恒温水槽中,保温 40 min 后,取出试件,使用马歇尔试验仪进行加载.

不同级配试件的马歇尔稳定度,如图 2 所示. 图 2 中: S_M 为马歇尔稳定度; t_0 为紫外线照射时间. 由图 2 可知:在紫外线的照射下,随着空隙率增大,马歇尔稳定度的降幅逐渐增大. 这是因为空隙率越大,紫外线越容易穿透试件照射进其内部,在光、水和空气的作用下,沥青混合料逐渐老化,降低沥青与骨料之间的粘结性. 由此可知,空隙率越大,紫外线对沥青混合料的老化影响越显著.

由图 2 还可知:随着紫外线照射时间的增加,马歇尔稳定度降幅逐渐增大,紫外线对沥青混合料老化程度的影响逐渐增大.

3.2 二氧化钛掺量和彩色沥青的颜色

在分析二氧化钛掺量对彩色沥青紫外线老化性能的影响时,首先,在红色乳化沥青中掺加质量分数(δ)分别为 2.0%,2.5%,3.0%,3.5%,4.0%的 TiO_2 ,使用高速剪切分散机,以 $7\,500\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度剪切分散 30 min,直至沥青均匀稳定. 然后,将 TiO_2 改性乳化沥青在已经成型 24 h 之后的级配 1 母体试件上涂抹 1 mm 厚度,涂刷完成后,用玻璃棒在表面来回滚动,确保表面平整,在 25℃室温下,固化 12 h. TiO_2 改性红色乳化沥青马歇尔试件,如图 3 所示.

试件分别经过 24,48,72 h 紫外线老化处理后,根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[16]进行沥青混合料马歇尔稳定度试验. 将经过紫外线老化处理的试件放置于 (60 ± 1) ℃的恒温水槽中,保温 40 min 后,取出试件,使用马歇尔试验仪进行加载.

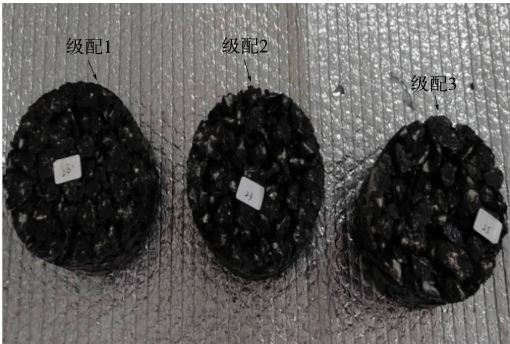


图 1 母体马歇尔试件
Fig. 1 Matrix Marshall test pieces

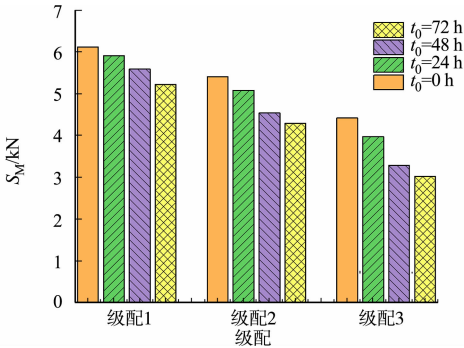


图 2 不同级配试件的马歇尔稳定度
Fig. 2 Marshall stability of different graded test pieces

改性红色乳化沥青的马歇尔稳定度,如图 4 所示.由图 4 可知:随着 TiO_2 掺量的增加,经过紫外线照射的彩色沥青试件的马歇尔稳定度呈先上升后下降的趋势;当 TiO_2 掺量为 3.0% 时,试件的马歇尔稳定度最高,且随着照射时间增长,马歇尔稳定度降幅相对较小,即此时的抗紫外线老化性能最佳.

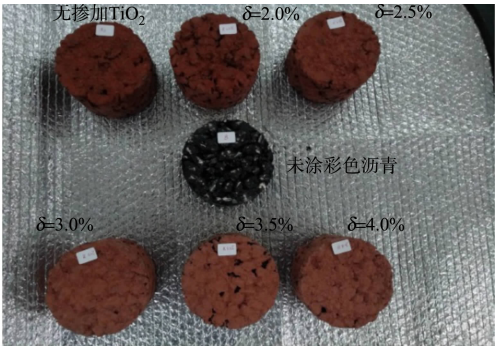


图 3 改性红色乳化沥青马歇尔试件
Fig. 3 Modified red emulsified asphalt
Marshall test pieces

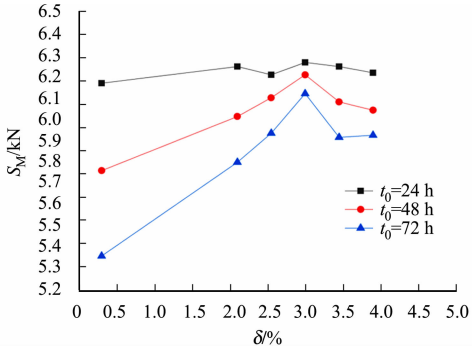


图 4 改性红色乳化沥青试件的马歇尔稳定度
Fig. 4 Marshall stability of modified
red emulsified asphalt test pieces

经过紫外线老化处理后,取掺加 TiO_2 的红色沥青马歇尔试件的表面颗粒进行电镜扫描,结果如图 5 所示.同时,通过线扫描进行 Ti 元素能谱分析,结果如图 6 所示.图 6 中: d 为线性扫描的距离;CPS 为计数率.

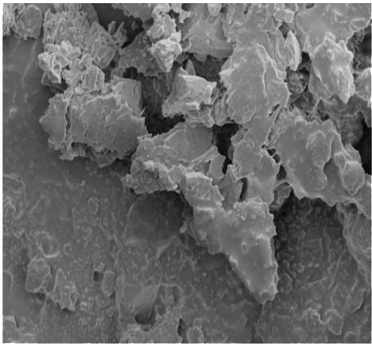


图 5 电镜扫描微观照片
Fig. 5 Micrograph of SEM scan

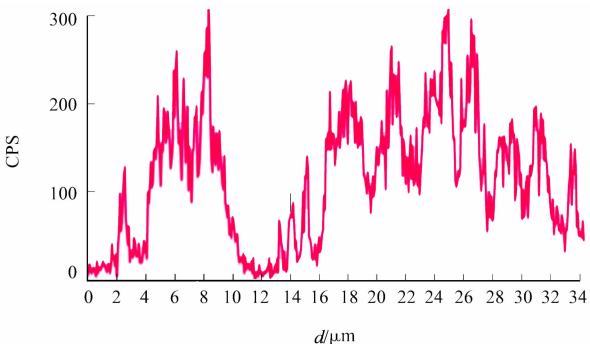


图 6 Ti 元素能谱分析
Fig. 6 Tielement energy spectrum analysis

在紫外线照射下,沥青与骨料之间略有分层,但整体依旧粘结在一起,并未造成十分严重的影响. TiO_2 在搅拌的过程中出现团聚的现象,同时,由于 TiO_2 主要通过吸收、反射和散射紫外线达到屏蔽紫外线的目的,在这个过程中也会导致团聚现象的产生,若团聚严重,则不利于屏蔽紫外线.因此,应尽量增加搅拌时间,使 TiO_2 分布得更加均匀.

在掺加 TiO_2 的过程中,随着 TiO_2 掺量的增加,红色乳化沥青逐渐变浅,参照色度图^[22-24],可找到该颜色对应的波长,以颜色波长对颜色进行量化,随着 TiO_2 掺量的增加,颜色波长逐渐减小.因此,彩色沥青混合料的颜色也是紫外线老化的影响因素.

3.3 灰色关联分析

为了分析不同影响因素对彩色沥青混合料紫外线老化程度的影响,采用红色和绿色两种彩色乳化沥青,制备红、绿两种颜色的马歇尔试件,经过 24,48,72 h 的紫外线照射后,根据 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》^[16] 进行沥青混合料马歇尔稳定度试验,将试件均置于 $(60\pm1)^\circ\text{C}$ 的恒温水槽中,保温 40 min 后,取出试件,使用马歇尔试验仪进行加载,得到试验的原始数据.

对颜色波长、空隙率、二氧化钛掺量和紫外线照射时间与经紫外线处理后的试件的马歇尔稳定度进行灰色关联分析.其中,经紫外线处理后的试件的马歇尔稳定度为参考数列;颜色波长、空隙率、二氧化钛掺量和紫外线照射时间为比较数列.

试验的原始数据,如表 5 所示.表 5 中: $X_0\sim X_4$ 分别为马歇尔稳定度、 TiO_2 掺量、颜色波长、空隙率及紫外线照射时间的原始数据.

表 5 试验的原始数据
Tab. 5 Raw datas of test

试验 编号	X_0/kN	$X_1/\%$	X_2/nm	$X_3/\%$	X_4/h	试验 编号	X_0/kN	$X_1/\%$	X_2/nm	$X_3/\%$	X_4/h
1	5.34	0	730	20	72	12	4.16	3.0	690	25	72
2	5.79	2.0	710	20	72	13	5.45	3.0	690	23	48
3	5.93	2.5	700	20	72	14	4.45	3.0	690	25	48
4	6.12	3.0	690	20	72	15	5.68	3.0	690	23	24
5	5.91	3.5	680	20	72	16	4.78	3.0	690	25	24
6	5.22	0	550	20	72	17	5.22	3.0	520	23	72
7	5.59	2.0	530	20	72	18	3.98	3.0	520	25	72
8	5.78	2.5	525	20	72	19	5.41	3.0	520	23	48
9	5.96	3.0	520	20	72	20	4.25	3.0	520	25	48
10	5.73	3.5	515	20	72	21	5.65	3.0	520	23	24
11	5.25	3.0	690	23	72	22	4.59	3.0	520	25	24

根据式(1)将原始数据进行无量纲化处理,实现参数初始化.指标初始值,如表 6 所示.表 6 中: $Y_0 \sim Y_4$ 分别表示马歇尔稳定度、 TiO_2 掺量、颜色波长、空隙率及紫外线照射时间的指标初始值.

表 6 指标初始值
Tab. 6 Initial values of indexes

试验 编号	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	试验 编号	Y_0	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	0.088	-2.840	1.358	-1.003	0.681	12	-1.759	0.392	0.907	1.296	0.681
2	0.793	-0.686	1.133	-1.003	0.681	13	0.260	0.392	0.907	0.376	-0.568
3	1.012	-0.147	1.020	-1.003	0.681	14	-1.305	0.392	0.907	1.296	-0.568
4	1.309	0.392	0.907	-1.003	0.681	15	0.620	0.392	0.907	0.376	-1.817
5	0.980	0.930	0.794	-1.003	0.681	16	-0.788	0.392	0.907	1.296	-1.817
6	-0.100	-2.840	-0.671	-1.003	0.681	17	-0.100	0.392	-1.010	0.376	0.681
7	0.480	-0.686	-0.897	-1.003	0.681	18	-2.041	0.392	-1.010	1.296	0.681
8	0.777	-0.147	-0.953	-1.003	0.681	19	0.198	0.392	-1.010	0.376	-0.568
9	1.059	0.392	-1.010	-1.003	0.681	20	-1.618	0.392	-1.010	1.296	-0.568
10	0.699	0.930	-1.066	-1.003	0.681	21	0.573	0.392	-1.010	0.376	-1.817
11	-0.053	0.392	0.907	0.376	0.681	22	-1.086	0.392	-1.010	1.296	-1.817

根据式(2)计算比较数列与参考数列在各点的绝对差.参考数列与比较数列的差数列,如表 7 所示.表 7 中: $\Delta_1 \sim \Delta_4$ 为参考数列(经过紫外线老化试件的马歇尔稳定度)与比较数列(TiO_2 掺量、颜色波长、空隙率、紫外线照射时间)的绝对差.

根据式(3)计算经过紫外线老化试件的马歇尔稳定度与 TiO_2 掺量、颜色波长、空隙率、紫外线照射时间的关联系数,分别记为 $\xi_1 \sim \xi_4$,结果如表 8 所示.

将关联系数代入式(4),可计算出经过紫外线老化的试件的马歇尔稳定度与 TiO_2 掺量、颜色波长、空隙率、紫外线照射时间的关联度 $r_1 \sim r_4$,分别为 0.661,0.601,0.615,0.772.

由灰色关联分析可知: $r_4 > r_1 > r_3 > r_2$,彩色沥青混合料紫外线老化性能最大的影响因素是紫外线照射时间,其次是 TiO_2 掺量和空隙率,最后是颜色,这 4 个影响因素的灰色关联度均大于 0.600,关联度为强度^[25-27],说明这 4 个影响因素对彩色沥青混合料的紫外线老化性能均有重要影响.

表 7 参考数列与比较数列的差数列
Tab. 7 Difference series between reference series and comparison series

试验编号	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	试验编号	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
1	2.929	1.270	1.092	0.593	12	2.151	2.666	3.055	2.440
2	1.478	0.340	1.796	0.111	13	0.131	0.647	0.116	0.828
3	1.159	0.008	2.015	0.330	14	1.697	2.212	2.601	0.737
4	0.917	0.402	2.313	0.628	15	0.229	0.287	0.244	2.438

续表

Continue table

试验编号	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	试验编号	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4
5	0.050	0.186	1.984	0.299	16	1.180	1.696	2.085	1.029
6	2.741	0.572	0.904	0.781	17	0.491	0.910	0.476	0.781
7	1.165	1.377	1.483	0.202	18	2.432	1.031	3.337	2.722
8	0.924	1.730	1.780	0.096	19	0.194	1.208	0.179	0.766
9	0.667	2.068	2.062	0.377	20	2.010	0.608	2.914	1.050
10	0.232	1.765	1.702	0.017	21	0.182	1.583	0.197	2.391
11	0.444	0.960	0.429	0.734	22	1.478	0.076	2.382	0.731

表 8 关 联 系 数 表

Tab. 8 Correlation coefficients

试验编号	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	试验编号	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4
1	0.365	0.571	0.607	0.741	12	0.439	0.387	0.355	0.408
2	0.533	0.835	0.484	0.942	13	0.932	0.724	0.940	0.672
3	0.593	1.000	0.455	0.839	14	0.498	0.432	0.393	0.697
4	0.648	0.810	0.421	0.730	15	0.884	0.858	0.877	0.408
5	0.976	0.904	0.459	0.852	16	0.589	0.498	0.447	0.622
6	0.380	0.748	0.652	0.684	17	0.776	0.650	0.782	0.684
7	0.592	0.551	0.532	0.896	18	0.409	0.621	0.335	0.382
8	0.647	0.493	0.486	0.951	19	0.900	0.583	0.908	0.689
9	0.718	0.449	0.449	0.820	20	0.456	0.736	0.366	0.617
10	0.882	0.488	0.497	0.995	21	0.906	0.516	0.899	0.413
11	0.794	0.638	0.799	0.698	22	0.533	0.961	0.414	0.699

4 结 论

- 1) 在大空隙的排水沥青路面中,根据标准马歇尔试验结果的降幅可知,随着照射时间的增加和空隙率的增大,马歇尔稳定度降幅逐渐增大,紫外线对沥青混合料的老化程度的影响逐渐增大.
- 2) 根据标准马歇尔试验、电镜扫描和能谱分析可知,TiO₂ 具有提高沥青混合料的抗紫外线老化的作用,对于大空隙排水沥青路面而言,将掺加 TiO₂ 改性的彩色乳化沥青作为彩色沥青混合料涂层,当 TiO₂ 掺量为 3.0%时,随着照射时间的增加,马歇尔稳定度的降幅最小,彩色沥青混合料的抗紫外线老化能力最佳.
- 3) TiO₂ 能使彩色乳化沥青的颜色变浅,根据色度图可知,随着 TiO₂ 掺量的增加,其颜色的波长逐渐减小.
- 4) 由马歇尔稳定度与 4 种影响因素的关联度可知,彩色沥青紫外线老化的影响因素按照重要程度排序为紫外线照射时间>TiO₂ 掺量>空隙率>颜色,且试验中的这 4 个影响因素的灰色关联度均大于 0.600,说明紫外线照射时间、彩色沥青的颜色、TiO₂ 掺量和母体沥青混合料的空隙率均对彩色沥青紫外线老化有重要影响.

参考文献:

[1] 王雅儒,曹东伟,唐国奇. 彩色排水沥青路面色彩耐久性研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2014,10(2):21-25.

[2] 何文华,郭韦韦,杨群. 氙灯加速老化对沥青混合料性能的影响[J]. 华东交通大学学报,2012,29(2):15-20. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0523.2012.02.004.

[3] 孙式霜,王彦敏,张爱勤,等. 紫外线吸收抗老化剂在沥青混合料中的应用[J]. 公路工程,2012,37(4):109-113.

[4] 郑木莲,何利涛,高璇,等. 基于降温功能的沥青路面热反射涂层性能分析[J]. 交通运输工程学报,2013,13(5):10-16.

[5] 张争奇,张世豪,郭大同,等. 彩色反射式沥青路面涂层的路用性能[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2018,39(5):

611-616.

[6] ZHANG Henglong, CHEN Zihao, LI Lu. Evaluation of aging behaviors of asphalt with different thermo chromic powders[J]. Construction and Building Materials, 2017, 155: 1198-1205.

[7] ZHENG Dong, QIAN Zhendong, LI Pan. Performance evaluation of high-elasticity asphalt mixture containing inorganic nano-titanium dioxide for applications in high altitude regions[J]. Construction and Building Materials, 2019, 199: 594-600. DOI: 10. 1016/j. constrbuildmat. 2018. 12. 053.

[8] 韦经纬. 彩色沥青混合料路用性能及耐久性试验研究[J]. 路基工程, 2016(5): 106-108. DOI: 10. 13379/j. issn. 1003-8825. 2016. 05. 22.

[9] 沈一川. 基于紫外老化的彩色沥青混合料色彩保持性能评价研究[J]. 黑龙江交通科技, 2014, 37(9): 3-6. DOI: 10. 3969/j. issn. 1008-3383. 2014. 09. 002.

[10] 张文刚, 王芳, 李颖. 纳米 TiO₂ 对沥青抗紫外线老化性能影响研究[J]. 公路工程, 2018, 43(2): 206-209.

[11] 刘思峰, 杨英杰. 灰色系统研究进展(2004—2014)[J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 47(1): 1-18. DOI: 10. 16356/j. 1005-2615. 2015. 01. 001.

[12] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1987.

[13] 包惠明, 傅涛, 段星星. 赤泥质量分数与沥青性能的灰色关联分析[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 54-58, 7-8.

[14] 邓聚龙. 灰色控制系统[J]. 华中工学院学报, 1982, 10(3): 9-18.

[15] 李炳军, 朱春阳, 周杰. 原始数据无量纲化处理对灰色关联序的影响[J]. 河南农业大学学报, 2002, 36(2): 199-202. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-2340. 2002. 02. 024.

[16] 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.

[17] 交通运输部公路科学研究院. 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, 2005.

[18] 张肖宁, 郭祖辛, 吴旷怀. 按体积法设计沥青混合料[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(2): 28-36.

[19] 程磊, 郝培文. 基于体积法的半柔性路面母体沥青混合料设计方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(1): 1-3. DOI: 10. 3321/j. issn: 1671-8879. 2002. 01. 001.

[20] 肖鑫, 张肖宁. 基于 CAVF 法的排水沥青混合料组成设计[J]. 公路交通科技, 2016, 33(10): 7-12.

[21] 李东海, 李智. OGFC 沥青混合料设计中 CAVF 法[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(27): 7134-7137.

[22] 刘翠萍, 于佳, 黎旭艳, 等. LED 用于彩色全息图照明的色度研究[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 218-221.

[23] 陈红雨. 定量测量色度学实验设计[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 132-135.

[24] 陈喜胜. 基于图像处理的污水排放色度检测方法研究[D]. 广州: 广东技术师范学院, 2018.

[25] 贺祥, 林振山, 刘会玉, 等. 基于灰色关联模型对江苏省 PM_{2.5} 浓度影响因素的分析[J]. 地理学报, 2016, 71(7): 1119-1129. DOI: 10. 11821/dlxb201607003.

[26] 赵大勇. 基于灰色关联分析的沥青混合料紫外线老化影响因素研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.

[27] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)