DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2025.02.009 文章编号:1671-2579(2025)02-0083-07

基于旋转瓶试验的多源集料黏附性能评价

吴倩[1],童戴舟[2],陈松强[3],张群峰[2],任智勤[2]
(1.浙江省交通投资集团有限公司,浙江 杭州 310020;2.浙江交工集团股份有限公司,浙江 杭州 310012;
3.浙大城市学院,浙江 杭州 310015)

摘要:路面工程中集料来源不同导致了集料性质的巨大差异,从而影响集料与沥青的黏附性能,精准评估和区分多源集料与沥青的黏附性能,是保证沥青路面性能的重要前提。该文提出基于旋转瓶试验和图像处理的多源集料与改性沥青的评价方法,该方法将裹附改性沥青的多源集料进行了旋转瓶试验,通过图像处理得到的沥青剥落率来定量评价黏附性能,进而对浸水冲刷时间作用、沥青老化作用等因素的影响情况进行分析。评价结果表明:该方法能明显区分出多源集料黏附性差异,具有一定现实及工程意义。

关键词:道路工程;多源集料;旋转瓶试验;Matlab图像处理;黏附性能
中图分类号:U416.217 **文献标志码:**A

Evaluation of Multi-Source Aggregate Adhesion Performance Based on Rotary Bottle Test

WU Qian[1], TONG Daizhou[2], CHEN Songqiang[3], ZHANG Qunfeng[2], REN Zhiqin[2]
(1. Zhejiang Communications Investment Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310020, China; 2. Zhejiang Communications Construction; Group Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310012, China; 3. Hangzhou City University, Hangzhou, Zhejiang 310015, China)

Abstract: The diversification of aggregate sources in pavement engineering has led to significant differences in aggregate properties, thereby affecting the adhesion performance between aggregates and asphalt. Accurately evaluating and distinguishing the adhesion performance between multi-source aggregates and asphalt are important prerequisites for ensuring the performance of asphalt pavement. A method for evaluating multi-source aggregates and modified asphalt based on rotary bottle tests and image processing was proposed. Rotary bottle tests were conducted on multi-source aggregates coated with modified asphalt, and the adhesion performance was quantitatively evaluated through the asphalt spalling rate obtained from image processing. Furthermore, the influence of factors such as immersion time and asphalt aging was analyzed. The evaluation results indicate that this method can clearly distinguish the differences in adhesion performance of multi-source aggregates, which has certain practical and engineering significance.

Keywords: road engineering; multi-source aggregate; rotatory bottle test; Matlab image processing; adhesion performance

0 引言

沥青路面水损坏被定义为“行车荷载与水分作用下,集料与沥青胶结料之间的黏附力丧失或沥青胶结料内部黏聚力丧失导致的路面性能衰减”,说明集料与沥青之间黏附力的降低和沥青内聚力的丧失导致沥青劣化,这是水损坏发生的主要驱动机制[1-3]。其中,以集料与沥青胶结料之间黏附力的降低占主导作用[4]。因此,集料与沥青的黏附性能是保障沥青路面抗水损坏及耐久性的关键指标之一。

沥青混凝土中集料占总量的95%左右,且随着交通工程建设中集料逐年递增的大规模消耗,集料出现紧缺情况,集料供应也更趋于多源化。多源集料的成分组成和表面状况等性质差异巨大,而这些

收稿日期:2024-11-15(修改稿)
基金项目:浙江大学-浙江交工协同创新中心资助项目(编号:ZDJG2023005)
作者简介:吴倩,女,硕士,工程师.E-mail:837474381@qq.com

性质是影响黏附性能优劣的主要因素[5-7]。准确评价和区分多源集料与沥青的黏附性能,是工程中判别多源集料适用性的前提。

集料与沥青黏附性评价方法主要考虑的是裹附沥青的集料在有水状态下界面黏附性的丧失。一般通过制备一定数量裹附沥青的集料试件进行加速浸水、冲刷或化学反应等损伤,根据沥青从集料表面剥落的情况来判断黏附性能[8]。评价方法可以分为3类:静态剥落类、动态剥落类和化学剥落类[9-11],见表1。

表1 集料与沥青黏附性评价方法

Table 1 Evaluation method for adhesion performance between aggregates and asphalt

分类	测试过程	评价指标
静态剥落类	将裹附沥青的集料在恒定温度的水中浸泡一段时间	沥青膜剥落程度
动态剥落类	通过特定方式使裹附沥青的集料经受恒温水流冲刷	沥青膜剥落程度
化学剥落类	将裹附沥青的集料放入已知浓度的有色溶液静置或者将集料放入一定浓度的沥青-甲苯溶液,加水洗脱	集料表面沥青的吸附率和剥落率

《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)采用水煮法和水浸法进行黏附性测试。该方法属于静态剥落类评价方法,通过将表面裹附沥青的集料放置“微沸”的沸水当中一段时间后,肉眼观察沥青在集料表面剥落的情况,判断沥青与集料的黏附性能[12],见表2。

表2 集料与沥青的黏附性等级

Table 2 Adhesion performance grade between aggregates and asphalt

试验后集料表面上沥青膜剥落情况	等级
完全保存,剥离面积百分率接近于0	5
少部分为水所移动,厚度不均匀,剥离面积占比小于10%	4
局部明显地为水所移动,基本保留在集料表面上,剥离面积占比小于30%	3
大部为水所移动,局部保留在集料表面上,剥离面积占比大于30%	2
完全为水所移动,集料基本裸露,沥青全浮于水面上	1

水煮法或水浸法的定性分析方法相较于仪器价格较为高昂、操作复杂的定量试验,能够简单快速地给出黏附性评价结果,且对试验设备要求不高,在实际工程检测过程中该类试验长期存在[13]。但随着改性沥青的广泛应用,以及集料的多源化,该类试验方法已难以作为基于与改性沥青黏附性能的多源集料选取时的控制手段,集中体现出以下不足:

(1)试验结果采用“肉眼”进行评价,只能对集料-沥青黏附性进行定性评价,依赖测试者主观经验,无法得出客观的定量评价结果。

(2)不能很好地区分多源集料的黏附性能。对于与基质沥青黏附性的评价,能有比较明确的效果;对于黏度较高的改性沥青,黏附性评价等级往往都是5级,很难区分出黏附性较好的集料。

为此,本文采取动态剥落类中的旋转瓶试验代替水煮法或水浸法,通过裹附沥青的集料经受恒温水流冲刷后的沥青膜剥落程度,在便于工程可操作性的前提下,又能更好地区分多源集料与改性沥青的黏附性能。同时,基于Matlab自主开发图像处理程序,计算出旋转瓶试验后多源集料表面沥青剥落率,定量评价多源集料与改性沥青的黏附性能。

1 原材料及试验方法

旋转瓶试验方法是先将裹附沥青的集料在含水的玻璃瓶中旋转,再通过动态水冲刷以及集料碰撞等外界因素,对集料表面裹附的沥青进行剥离[14-15]。该动态剥落类试验方法相较于静态剥落类试验方法具有更好的剥落效果,能更好地区分多源集料之间黏附性能的差异性。

1.1 原材料

为使本次试验更有对比性和代表性,试验所用多源集料选取浙江省及其周边8种典型集料,具体为丽水市、绍兴市和宁波市地区的玄武岩,湖州地区的辉绿岩、台州和温州地区的凝灰岩、衢州地区的石灰岩以及铜陵地区的花岗岩。试验所用集料粒径规格均为9.5~13.2 mm。

对上述多源集料根据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中水煮法进行测试,8种集料的水煮法试验结果相近,除花岗岩的黏附等级为4级外,其余7种集料与改性沥青的黏附等级均为5级,显然该方法并不能有效区分各种集料与改性沥青的黏附性能。

试验所用改性沥青为SBS改性沥青I-D型,SBS掺量为5%,改性沥青相关质量符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)要求。

1.2 试验方案

1.2.1 试验材料制备

试验材料制备前,预先将试验所用多源集料置

于温度设定为（110±5）℃的通风烘箱中，烘干至恒定质量。将试验所用改性沥青置于温度设定为180 ℃的烘箱中加热3 h。

试验所用每种集料称取300 g，分别与10 g的改性沥青倒入搅拌碗中，用刮刀将集料和改性沥青充分混合，确保集料表面完全被改性沥青覆盖。裹附改性沥青后的集料铺撒在铺有硅酮纸的托盘上，在环境温度下存放12 h以上待其冷却。

如图1所示，将裹附后的每种集料平均分成3份，每份质量100 g。在旋转瓶中先倒入1/2容量的蒸馏水，再装入一份裹附后集料，装瓶时为了减少集料间的黏附，采用逐颗依次装入的方式。装入后再添加蒸馏水至旋装瓶瓶肩位置。

（a）裹附改性沥青的集料　　（b）集料装样

图1　试验材料制备

Figure 1　Preparation of test materials

1.2.2　试验流程

将旋转瓶放在滚瓶机上，转速控制为60 r/min，试验基准时间控制在12 h±15 min[16]。试验结束后，倒出集料，擦干表面水分，放至测试碗中，获取试验后集料原始图片，如图2所示。

图2　旋转瓶试验照片

Figure 2　Photo of rotatory bottle test

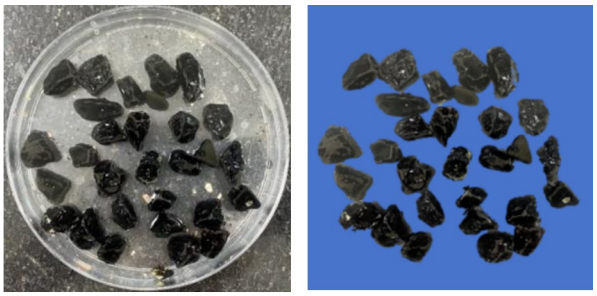
根据试验结果差异程度和后续黏附性能分析的需要，部分类型集料需要延长试验时间，在基准时间的基础上，增加24 h±15 min、36 h±15 min和48 h±15 min 3个时间节点。每到1个时间节点暂时停止滚瓶机滚动程序，倒出集料获取该时间节点的集料原始图片后，按之前方法重新将集料和蒸馏水装入旋转瓶中，继续滚动程序。

2　基于图像处理的分析方法

开发基于Matlab软件的图像处理程序，利用色素差异计算旋转瓶试验后集料表面沥青剥落率，对试验结果进行定量化分析。

2.1　原始图像预处理

使用Photoshop软件对旋转瓶试验后获取的图片进行预处理，如图3所示。首先对图像面积划定和图像背景处理。再采用方形区域划分方法[17-18]，截取圆形测试碗外接正方形（边长为10 cm），保证每张预处理后的尺寸一致。最后，截取部分集料图像，并附上背景图，使预处理后的图像由沥青、集料以及背景图像3部分组成。



（a）原始图像　　（b）预处理后图像

图3　图像预处理前后对比

Figure 3　Comparison of images before and after preprocessing

图像预处理后像素直方图如图4所示。

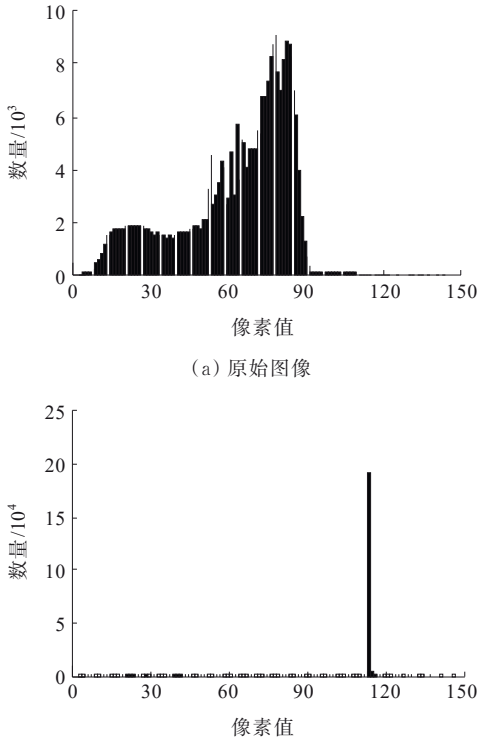
从图像预处理前后像素对比可以看出：原始图像的像素跨度较大，容易导致后续图像识别出现偏差；预处理后像素值高度集中，可以保证后续图像识别的精度。

2.2　灰度及二值化处理

首先对预处理后的图像进行灰度化处理，通过消除图像色调和饱和度信息，同时保留亮度实现将RGB图像或彩色图转化成灰度图像[19]。调用Matlab软件中的rgb2gray函数将图像灰度化，接着对图像进行中值滤波等操作，消除图像的噪声，增强图像质量[20]。

灰度处理后的图像按灰度特性，采用Matlab软件中OTSU阈值分割法，进行图像的二值化处理。OTSU阈值分割算法计算时，将分割后的图像与预处理后的图片进行对比，若存在误差则进行调节灰度阈值至最佳效果。二值化后的图像分为黑和白两

部分，黑或白色部分的面积可通过Matlab软件编写的程序cover-area来确定，如图5所示。

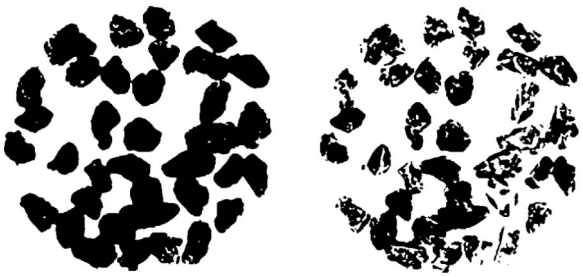


(a) 原始图像

(b) 预处理后图像

图4 图像预处理前后像素对比

Figure 4 Pixel comparison before and after image preprocessing



(a) 沥青全裹覆 (b) 沥青部分裹覆

图5 集料表面沥青裹覆面积示意图

Figure 5 Asphalt coating area on aggregate surface

在旋转瓶试验前的图像中，集料表面完全裹附着沥青，黑色部分为集料表面沥青全裹覆面积S_C(集料面积)。试验后的图像中，集料表面部分沥青剥落，黑色部分为集料表面剩余沥青裹覆面积S_T。

2.3 沥青剥落率计算

通过图像处理获取的原始集料表面沥青全裹覆面积S_C和T时长试验后集料表面剩余沥青裹覆面积S_T，计算集料表面沥青剥落面积S_B，见式(1)，并进一步计算出沥青剥落率R_B，见式(2)。

$$S_B = S_C - S_T \tag{1}$$

$$R_B = \frac{S_B}{S_C} \times 100 \tag{2}$$

3 试验结果与分析

3.1 多源集料黏附性分析

通过旋转瓶试验和图像处理后得到的沥青剥落率，评价多源集料与改性沥青的黏附性能，试验所用8种集料12 h旋转瓶试验结果，以及根据式(1)、(2)，计算出12 h旋转瓶试验后集料表面沥青剥落面积S_B和沥青剥落率R_B，结果如图6所示。

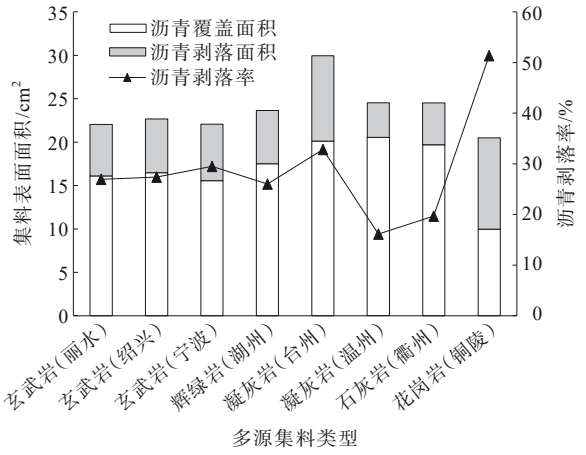


图6 多源集料12 h旋转瓶试验沥青剥落状况

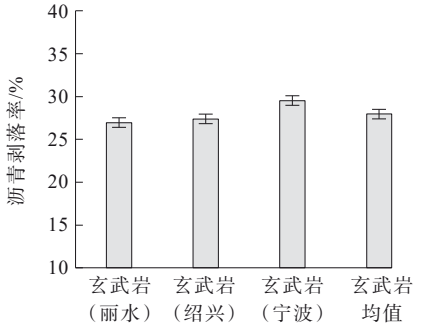
Figure 6 Asphalt spalling in rotatory bottle test of multi-source aggregates after 12 h

由图6可知：石灰岩(衢州)12 h沥青剥落率仅为19.8%，明显低于玄武岩和辉绿岩，花岗岩与沥青的黏附性最差，12 h沥青剥落率达到了51.4%。

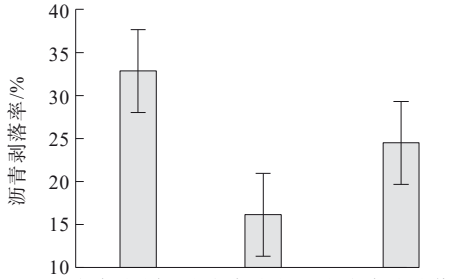
对比多源集料水煮法试验结果，除花岗岩外，其余7种与改性沥青黏附等级为5级的集料，12 h沥青剥落率为16.2%～32.8%，沥青剥落率存在明显的差异，表明采用旋转瓶试验和图像处理的方法，在水煮法的基础上进一步区分多源集料的黏附性能是非常有必要的。

为了分析相同岩性不同来源的集料与改性沥青黏附性的区别，选取玄武岩和凝灰岩进行对比，结果见图7。

由图7可知：① 不同来源的玄武岩12 h旋转瓶试验结果相近，沥青剥落率为27.0%～29.5%，表明：不同来源的玄武岩与沥青均具有较好的黏附性，且性能相对稳定。相比较而言，玄武岩(丽水)最优，玄



(a) 玄武岩与改性沥青黏附性



(b) 凝灰岩与改性沥青黏附性

图7　集料与改性沥青的黏附性

Figure 7　Adhesion between aggregate and modified asphalt

武岩(绍兴)次之,玄武岩(宁波)最差;② 不同来源的凝灰岩12 h旋转瓶试验结果差异很大,凝灰岩(温州)12 h的剥落率仅为16.2%,是试验所用集料中最低的,而凝灰岩(台州)12 h剥落率达到32.8%,表明不同料源的凝灰岩的黏附性波动很大。

3.2　浸水冲刷时间对黏附性的影响

从12 h旋转瓶试验结果发现,不同来源的玄武岩以及辉绿岩的区分度不够,为此针对玄武岩(丽水)、玄武岩(绍兴)、玄武岩(宁波)和辉绿岩(湖州)4种集料增加24 h、36 h和48 h旋转瓶试验,并通过图像处理得到相应时间节点的沥青剥落率。

4种集料沥青剥落率随试验时间的变化规律和4种集料在相同试验时间下集料间沥青剥落率差异程度见图8、9。

由图8可知:随着试验时间的增加,集料表面剥落的沥青面积也逐渐增加,即沥青剥落率增加,但剥落速率会逐渐变缓。

由图9可知:① 时间为12 h试验结果得出黏附性排序为:辉绿岩(湖州)>玄武岩(绍兴)>玄武岩(丽水)>玄武岩(宁波)。时间为24 h及以上的试验结果得出黏附性排序为:玄武岩(绍兴)>辉绿岩(湖

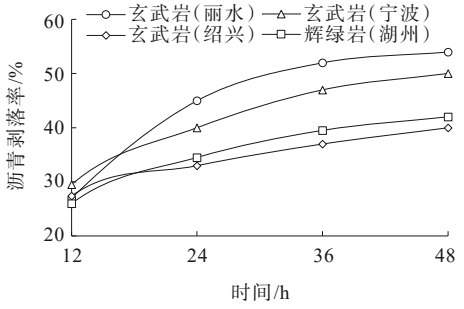
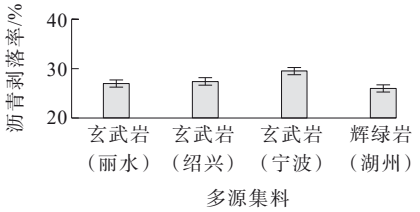
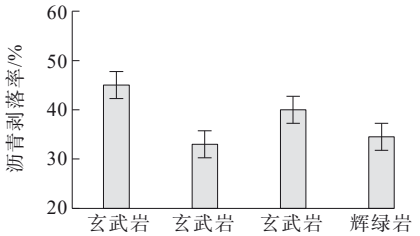


图8　沥青剥落率随试验时间变化规律

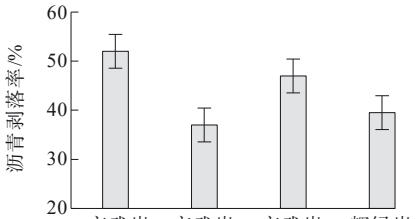
Figure 8　Variation of asphalt spalling rate with test time



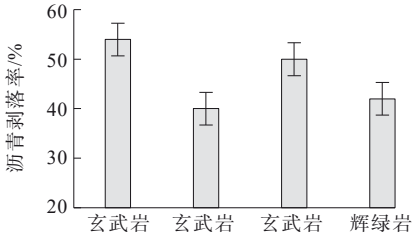
(a) 12 h试验结果对比



(b) 24 h试验结果对比



(c) 36 h试验结果对比



(d) 48 h试验结果对比

图9　沥青剥落率随试验时间变化规律

Figure 9　Variation of asphalt spalling rate with test time

州)＞玄武岩(宁波)＞玄武岩(丽水);② 从相同试验时间下集料间沥青剥落率差异程度对比可以明显地看出,针对12 h试验结果相近的多源集料,延长试验时间,能进一步地进行区分改性沥青与集料的黏附性。试验时间为24 h及以上的试验结果表明:玄武岩(绍兴)和辉绿岩(湖州)黏附性能明显优于玄武岩(宁波)和玄武岩(丽水)。

3.3 沥青老化对黏附性的影响

沥青老化过程中,各组分均会发生变化,从而直接影响沥青路面的各项路用性能和耐久性能。本文从沥青剥落率的对比来分析沥青老化对黏附性的影响。

采用薄膜烘箱对改性沥青进行24 h老化处理,并将未进行老化处理的改性沥青分别与玄武岩(丽水)进行裹附,并进行12 h、24 h、36 h和48 h的旋转瓶试验,试验结果见图10。

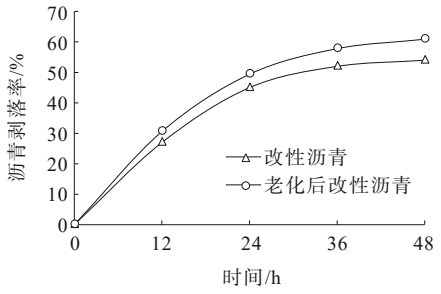


图10 沥青剥落率随试验时间变化规律

Figure 10 Variation of asphalt spalling rate with test time

集料裹附老化后改性沥青,随着时间变化的沥青剥落率与未老化改性沥青具有相同的变化趋势,但在相同试验时间下,老化后改性沥青剥落率大于未老化改性沥青,表明:改性沥青与集料的黏附性由于沥青老化而降低,且随着时间的推移,两者的差值越来越大,沥青老化对长期黏附性影响更大。

4 结论

针对现行规范对多源集料与改性沥青黏附性能评价上的不足,探索了基于旋转瓶试验和图像处理的定量评价方法,具有一定工程应用价值。根据旋转瓶试验和图像处理方法,评价多源集料和改性沥青黏附性能,得出以下结论:

(1) 从多源集料12 h旋转瓶试验沥青剥落状况来看,石灰岩(衢州)沥青剥落率最低,花岗岩沥青剥落率最高。对比相同岩性不同来源集料的黏附性,可以看出不同来源的玄武岩黏附性相对稳定,而不同来源的凝灰岩黏附性差异很大。

(2) 对比多源集料水煮法试验结果,与改性沥青黏附等级均为5级的7种集料,12 h旋转瓶试验得出的沥青剥落率为16.2%～32.8%,沥青剥落率存在明显的差异,表明:旋转瓶试验和图像处理的评价方法对多源集料的黏附性具有很好的区分性。

(3) 延长旋转瓶试验时间,发现集料表面沥青剥落率逐渐增加,但剥落速率逐渐变缓。针对12 h试验结果相近的多源集料。从相同试验时间下相互间沥青剥落率差异程度还可以看出,延长试验时间,能进一步区分黏附性优劣,以及判别长期黏附性能。

(4) 集料裹附老化后改性沥青,沥青剥落率与未老化改性沥青具有相同的变化趋势,但相同试验时间下,沥青剥落率更大,表明:沥青与集料的黏附性由于沥青老化而降低,且随着时间的推移,两者的差值越来越大,沥青老化对长期黏附性影响更大。

参考文献:

References:

[1] 王玉林,徐宁,卢东.提升沥青路面抗水损害能力措施综述[J].中外公路,2022,42(1):66-72.
WANG Yulin, XU Ning, LU Dong. Summary of measures to improve water damage resistance of asphalt pavement [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 66-72.

[2] MEHRARA A,KHODAII A.A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete[J].Construction and Building Materials,2013,38:423-442.

[3] LIU K F, DENG L F, ZHENG J Y. Nanoscale study on water damage for different warm mix asphalt binders[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2016,9(6):405-413.

[4] CANESTRARI F, CARDONE F, GRAZIANI A, et al. Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage[J]. Road Materials and Pavement Design,2010,11(sup 1):11-32.

[5] 甘新立.集料与沥青的表面特性分析及黏附性评价[D].西安:长安大学,2017.
GAN Xinli.The surface character analysis of bitumen and aggregates and the evaluation of the adhesion between them[D].Xi'an:Chang'an University,2017.

[6] 李玉,张映雪,邱超,等.沥青与花岗岩碎石黏附性能改善技术研究[J/OL].中外公路,1-9[2024-10-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241011.1050.002.html.
LI Yu, ZHANG Yingxue, QIU Chao, et al. Research on improving the adhesive properties of asphalt and granite gravel[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-9

[2024-10-11]. http://kns. cnki. net/kcms/detail/43.1363.U.20241011.1050.002.html.

[7] 王志祥,李建阁,张争奇.集料形态特征对集料–沥青黏附及水稳定性的影响[J].建筑材料学报,2021,24(5):1039-1047.
WANG Zhixiang, LI Jiange, ZHANG Zhengqi. Effects of aggregate morphological characteristics on adhesion of aggregate-asphalt and its moisture stability[J]. Journal of Building Materials,2021,24(5):1039-1047.

[8] 李善强,叶宏宇,方杨,等.沥青与集料黏附性评价方法[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(5):32-39
LI Shanqiang, YE Hongyu, FANG Yang, et al. Evaluation method of asphalt and aggregate adhesion durability[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2018,38(5):32-39.

[9] 宋艳茹,张玉贞.沥青粘附性能评价方法综述[J].石油沥青,2005,19(3):1-6
SONG Yanru, ZHANG Yuzhen. The evaluating methods' summary of asphalt adhesion[J]. Petroleum Asphalt, 2005, 19(3):1-6.

[10] CARO S, MASAD E, BHASIN A, et al. Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 2: Characterisation and modelling[J]. International Journal of Pavement Engineering,2008,9(2):99-114.

[11] 陈斌华.基于光电比色法的沥青与矿料粘附效应研究[D].西安:长安大学,2014.
CHEN Binhua. Based on the photoelectric colormetric method of asphalt and mineral aggregate adhesion effect [D].Xi'an:Chang'an University,2014.

[12] 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.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011[S]. Beijing:China Communications Press,2011.

[13] 张明欣,朱兴兴,王清亮,等.沥青-集料粘附性评价方法研究进展[J].材料导报,2022,36(增刊2):129-136.
ZHANG Mingxin,ZHU Xingxing,WANG Qingliang,et al. Research progress on evaluation methods of asphalt-aggregate adhesion[J]. Materials Reports, 2022, 36(sup 2): 129-136.

[14] GRÖNNIGER J,WISTUBA M P,RENKEN P.Adhesion in bitumen-aggregate-systems[J]. Road Materials and Pavement Design,2010,11(4):881-898.

[15] LANTIERI C, LAMPERTI R, SIMONE A, et al. Use of image analysis for the evaluation of rolling bottle tests results[J]. International Journal of Pavement Research and Technology,2017,10:45-53.

[16] AHMED Z S B,JAMES G,GORDON A,et al.Application of image analysis tools in MATLAB to better estimate the degree of binder coverage in rolling bottles test[J]. Road Materials and Pavement Design,2022,23(3):601-616.

[17] 唐伟,李宁,邹晓勇,等.基于图像处理技术的厂拌热再生混合料均匀性研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2023,42(1):60-65.
TANG Wei,LI Ning,ZOU Xiaoyong,et al.Homogeneity of plant-produced RAP mixtures based on DIP technology[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science),2023,42(1):60-65.

[18] 赵毅,杨旋,郝增恒,等.沥青混合料均匀性数字图像评价方法研究进展[J].材料导报,2020,34(23):23088-23099.
ZHAO Yi, YANG Xuan, HAO Zengheng, et al. Research progress on digital image evaluation method of homogeneity of asphalt mixture[J]. Materials Reports, 2020,34(23):23088-23099.

[19] 畅晓钰.基于数字图像技术的泡沫沥青效果评价方法研究[J].中外公路,2024,44(1):95-101.
CHANG Xiaoyu. Effect evaluation method of foamed asphalt based on digital image processing technology[J]. Journal of China & Foreign Highway,2024,44(1):95-101.

[20] 朱秀昌,刘峰,胡栋.数字图像处理与图像通信[M].4版.北京:北京邮电大学出版社,2016.
ZHU Xiuchang, LIU Feng, HU Dong. Digital image processing and image communication[M]. 4th ed. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press,2016.