

# 基于数字图像技术的泡沫沥青效果评价方法研究

畅晓钰<sup>1,2</sup>

(1.山西交通科学研究院集团有限公司,山西 太原 030000;2.山西省交通科技研发有限公司,山西 太原 030000)

**摘要:**针对目前泡沫沥青仅凭借经验粗略确定最佳发泡参数条件的不足,该文采用数字图像处理技术,通过对不同发泡条件下泡沫沥青与铣刨料RAI拌和后的混合料进行图像采集,然后进行灰度图像转化、形态学处理、二值图像转化及网格划分等处理过程,计算不同区域内沥青裹覆率,以沥青在混合料中的均匀分散性为指标,对泡沫沥青的发泡效果进行评价并优选发泡参数。结果表明:采用数字图像处理技术能够快速有效地对泡沫沥青均匀分散效果进行评价,可计算出精确的数值作为判断依据优选发泡参数,具有简单快捷、易于实施的优点。

**关键词:**泡沫沥青;数字图像处理;发泡参数;效果评价

中图分类号:U414

文献标志码:A

## Effect Evaluation Method of Foamed Asphalt Based on Digital Image Processing Technology

CHANG Xiaoyu<sup>1,2</sup>

(1.Shanxi Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030000, China;2.Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030000, China)

**Abstract:** In view of the shortage of determining the optimal foaming parameters of foamed asphalt only by experience, this paper adopted digital image processing technology to collect images of the mixture of foamed asphalt and milled material RAI obtained under different foaming conditions and carried out grayscale image conversion, morphological processing, binary image conversion, and image segmentation, so as to calculate the asphalt wrapping rate in different areas. With the uniform dispersion of asphalt in the mixture as the indicator, the foaming effect of foamed asphalt was evaluated, and the optimal foaming parameters were determined. The results show that the digital image processing technology can quickly and effectively evaluate the uniform dispersion effect of the foamed asphalt, and the accurate value can be calculated as the basis for judging the optimal foaming parameters. The technology has the advantages of simple and quick operation, and it is easy to implement.

**Keywords:** foamed asphalt; digital image processing; foaming parameters; effect evaluation

## 0 引言

泡沫沥青冷再生是指在废旧沥青混合料RAP或无机回收料RAI中掺加适量的泡沫沥青、新集料和水,对废旧材料进行循环利用,经过拌和摊铺等工艺,铺筑成型的性能良好的新结构层的技术。将该技术应用于工程施工中可充分利用道路养护中产生的废旧材料,推动公路养护走向绿色、循环、可持续

发展,经济环境效益显著<sup>[1]</sup>,同时具有良好的路用性能<sup>[2-3]</sup>和耐久性<sup>[4]</sup>。而对于泡沫沥青的发泡特性研究是该项技术的关键环节,泡沫沥青的发泡效果很大程度影响了泡沫沥青混合料性能及工程使用性能。

现有研究中主要采用的是膨胀率和半衰期两个指标进行评价,很多学者及相关领域研究人员对泡沫沥青发泡效果评价指标及发泡参数优选开展了大量研究。徐金枝等<sup>[5]</sup>以发泡指数作为补充指标,与现

投稿日期:2022-07-19(修改稿)

基金项目:山西交通控股集团有限公司科技项目(编号:19-JKKJ-19)

作者简介:畅晓钰,男,硕士,工程师.E-mail:709236976@qq.com

有膨胀率、半衰期指标相结合的方法进行优化评价;冯逸等<sup>[6]</sup>中提出了在膨胀率和半衰期基础上采用灰色关联理论进行关键参数优选;于泳潭<sup>[7]</sup>采用了简化效能指数,以发泡曲线和容许膨胀率面积作为评价指标,方法简单且具有可量化性;黄维蓉等<sup>[8]</sup>采用了非接触式方法的沥青发泡评价指标,采用激光测距仪、数码相机等设备对发泡全过程记录,并提出以泡沫直径、尺寸分布、消泡速率3个评价指标进行效果评价;徐金枝<sup>[9]</sup>采用筛分试验对泡沫沥青在混合料中的分散状态进行了研究,结果表明较好的沥青发泡效果能够提高泡沫沥青的分散均匀性;杜镇宇等<sup>[10]</sup>、张莹莹等<sup>[11]</sup>中基于数字图像技术,提出了颗粒分布面积的变异系数及面积控制系数来评价沥青混合料现场摊铺均匀性;李升连等<sup>[12]</sup>通过不同级配类型、光照强度、采集高度等条件,研究了采集方法对数字图像技术沥青混合料离析评价的影响。

泡沫沥青发泡的最终目的是赋予沥青拌和特性,确保沥青均匀分散地拌和到混合料中,以提供再生混合料一定的黏结强度。本文采用数字图像处理技术对不同发泡参数下泡沫沥青拌和后的均匀分散性进行了研究,并优选发泡条件。

## 1 泡沫沥青效果评价指标

### 1.1 膨胀率和半衰期

目前主要以膨胀率和半衰期进行评价,两个指标体现了泡沫沥青的黏度大小和稳定性。按照现有研究中两个指标的理解,膨胀率越大,泡沫沥青的黏度越小,其与混合料之间的相互接触越充分,拌和效果越好;半衰期越长,泡沫沥青的稳定性越好,与混合料的可拌和时间就越长,能达到的拌和效果越好。理论上两个指标均较高时,沥青的发泡效果较好,但实际中两者存在一定的负相关<sup>[13]</sup>,其中一个指标高时,另一个指标往往会比较差,发泡效果并不理想。对于最佳发泡参数往往凭借经验或者取中值的方法确定。

### 1.2 均匀分散性

本文提出了泡沫沥青的均匀分散性指标来评价其效果并优选最佳发泡参数,可直接根据拌和效果对泡沫沥青进行评价。

泡沫沥青与铣刨料RAI拌和后,以“点焊”的形式存在,此时泡沫沥青胶浆使粗细集料相互胶结,从

而使再生混合料具有一定的强度。泡沫沥青有一个最佳用量,用量过多或过少都会导致混合料性能下降,如果泡沫沥青拌和后均匀分散性差,混合料中泡沫沥青的量就会产生局部过多或者过少,此时沥青分散不均匀就会导致受力时局部薄弱处形成应力集中,泡沫沥青的分散均匀性差会造成偏差使得混合料性能一定程度的下降。因此,沥青在混合料中的分散均匀性对混合料性能起决定性作用。

### 1.3 计算模型的建立

采用图像分割的方法对图像进行等分,计算均值、变异系数等对沥青在图像中的均匀分布程度进行评价。变异系数可以很好地计量并反映离散程度,变异系数越小,代表分散越均匀,泡沫沥青的效果越好。所以,采用变异系数来探究沥青的均匀分散程度是合理的。

泡沫沥青在混合料中的分布情况如图1所示,对图像进行网格分割(图1以4×4为例)。

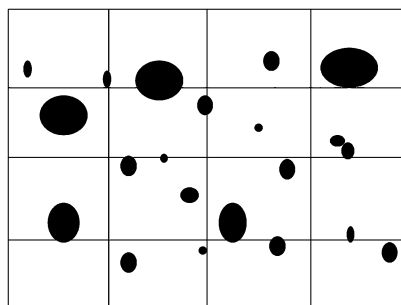


图1 泡沫沥青拌和后的分散形态

Figure 1 Dispersion of foamed asphalt after mixing

同时,在采集的每组图像中截取沥青团聚面积较大的3处,计算团聚位置像素作为沥青团聚指数,进行统计对比,团聚指数较小且较平均时代表沥青分散得更加均匀。

由于试验中取样的随机性,若混合料未拌和均匀,会存在所取样品中沥青含量过大或过小的情况,此时变异系数并不能很好地体现沥青在整体中的分散均匀性。为避免试验误差,更好地进行整体性评价,定义了泡沫沥青裹覆率控制系数,即任意一组图像沥青裹覆率与多组平均裹覆率的比值,比值越接近于1,越接近于均匀状态下泡沫沥青拌和后的分散形态。通过计算每组试验图像中沥青裹覆面积占比及裹覆率控制系数,进行横向对比,若某组试验中沥青裹覆率控制系数偏差较大时,可认为该组试验沥

青未分散均匀,所取样品与剩余混合料中的沥青存在偏差,拌和后沥青分散均匀性差。

通过对不同发泡条件下的泡沫沥青与铣刨料RAI拌和,采集图像,然后采用数字图像处理技术进行处理,并计算网格划分后不同区域内沥青裹覆率的变异系数、每组试验图像沥青团聚指数、裹覆面积比及控制系数,以探究泡沫沥青拌和后在混合料中分散的均匀性。

(1) 变异系数  $C_v$ 。

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \sum (\rho(i) - \bar{\rho})^2} / \bar{\rho} \quad (1)$$

式中: $n$ 为图像网格划分的个数; $\rho(i)$ 为第*i*个网格区域内沥青的裹覆率; $\bar{\rho}$ 为图像中沥青的平均裹覆率。

(2) 同时截取图像中沥青团聚面积较大的3处,计算团聚位置像素作为沥青团聚指数  $I_{AI}$ 。

(3) 沥青裹覆面积比  $\sigma$ 。

$$\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho(i) \quad (2)$$

(4) 控制系数  $M$ 。

$$M = \sigma(j) / \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \sigma(j) \quad (3)$$

式中: $m$ 为试验采集图像的组数; $\sigma(j)$ 第*j*组试验图像中泡沫沥青的裹覆率。

变异系数和团聚指数用于分析沥青在所取混合料样品中分散的均匀性,裹覆面积比和控制系数用于分析沥青在所拌和混合料整体中分散是否均匀。比较沥青裹覆率的变异系数  $C_v$ 、团聚指数  $I_{AI}$ 、裹覆面积比  $\sigma$  和控制系数  $M$ ,当变异系数和团聚指数较小,且裹覆面积比和控制系数无较大偏差时,沥青的发泡效果最好,各发泡参数为最佳。

## 2 试验

### 2.1 试验材料及设备

为了进行泡沫沥青效果优选,本文采用了中石油70#、中海70#及韩国SK70#3种A级道路石油沥青进行对比分析,以自来水作为发泡用水进行发泡。

试验中发泡设备选择德国维特根WLB 10S型仪器进行发泡,如图2所示,主要由沥青加热储存桶、水流量计、沥青泵等部分组成,可精确控制沥青的温度和发泡添加的水量;拌和设备采用维特根WLM 30型仪器进行拌和(图3)。采集图像需配备数码相机1台。



图2 发泡设备

Figure 2 Foaming equipment



图3 拌和设备

Figure 3 Mixing equipment

### 2.2 试验方法

(1) 采用3种不同的70#A级道路石油沥青(中石油70#、中海70#及韩国SK70#)、发泡用水量(1.5%、2%、2.5%、3%)、发泡温度(145℃、155℃、165℃)等参数进行沥青发泡试验,由测得的试验结果,按照《公路沥青路面再生技术规范》(JTG/T 5521—2019)中膨胀率 $\geq 10$ 倍,半衰期 $\geq 8$  s的规定,初选发泡沥青及其参数范围。

(2) 采用初选的沥青及参数范围,经过不同条件发泡后,将泡沫沥青与铣刨料RAI进行拌和,取同等质量的混合料满铺于形状大小相同的瓷盘中,然后置于60℃烘箱中烘干6~8 h后,进行图像采集。

(3) 基于Matlab数字图像处理技术,对试验采集的图像进行灰度图像转化、形态学处理、二值图像转化及网格划分等处理过程,计算图像中沥青的均匀分散性指标参数并对比,探析泡沫沥青的效果及优选发泡参数。

## 3 结果与讨论

### 3.1 发泡沥青及参数范围初选

不同品牌的沥青、不同的沥青发泡温度及发泡用水量等条件均会对泡沫沥青产生影响,导致沥青发泡效果的差异。经过不同条件下的发泡试验,对



泡沫沥青膨胀率、半衰期试验结果按  $y = a \ln x + b$  的形式进行拟合回归,并绘制变化规律曲线,结果如图4所示。

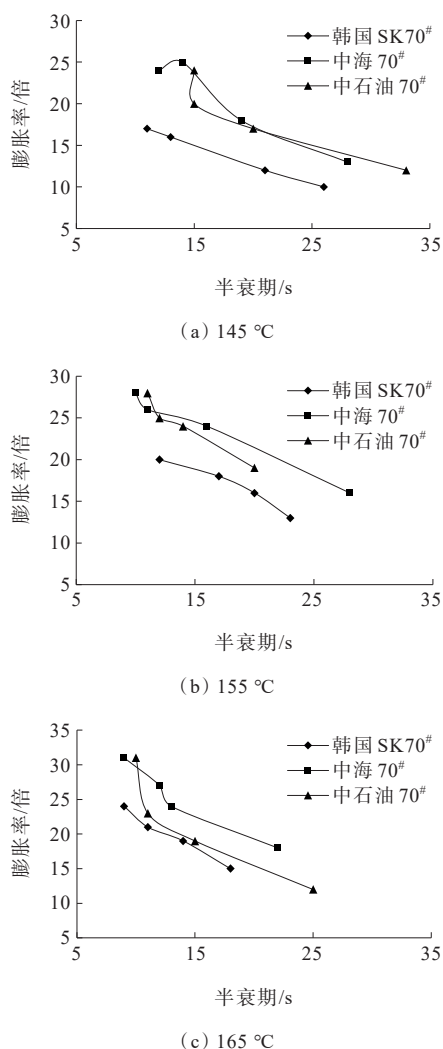


图4 3种沥青的发泡变化规律曲线

Figure 4 Foaming curves of three asphalts

由图4可知:

(1) 膨胀率和半衰期两个指标的试验结果拟合后呈现了较好的对数相关性,随着沿  $x$  轴及  $y$  轴的增大(即图像中曲线越靠右上),代表沥青的发泡效果越好。

(2) 由于沥青开采油源及种类的不同,导致其化学组成存在一定的差异。相关研究表明<sup>[14]</sup>,沥青的组成和结构决定了不同沥青表面能的差异,而整个发泡过程是沥青膜表面张力与内部蒸气压力相互作用的表现<sup>[15]</sup>,因此不同种类的沥青会出现不同的发泡效果变化规律<sup>[16]</sup>。在不同条件下,中海70#发泡效果均较其他两种好,韩国SK70#沥青发泡效果较差,中石油70#沥青在145 °C、155 °C时与中海70#的发泡

效果接近,温度升高发泡效果会产生差异。

(3) 当发泡试验所添加水量逐渐提高时,膨胀率慢慢变大,而半衰期则会慢慢变小;随沥青温度的升高,膨胀率一定程度上变大,半衰期随之慢慢减小。膨胀率和半衰期这两个指标间存在着负相关性。在本文所选试验条件范围内,膨胀率、半衰期结果均可达到规范中膨胀率 $\geq 10$ 倍、半衰期 $\geq 8$  s的规定值。

按照目前的研究,这种情况下只能通过经验取中值的方法来确定优选条件,较为粗略且并无判断依据。因此,本文中仅采用膨胀率和半衰期作为初选条件筛选,并提出均匀分散性指标对条件参数进一步优选。

### 3.2 均匀分散性分析

选择中海70#沥青,发泡用水量取1.5%、2%、2.5%、3%,发泡温度取145 °C、155 °C、165 °C,采用均匀分散性指标进一步探究其发泡效果。

试验采集拌和后再生混合料图像信息,采集过程中应保证拍摄高度、光照等条件,同时确保采集混合料图像面积范围一致。图像采集后进行灰度图像转化、形态学处理、二值图像转化及网格划分等过程,最终计算出每幅图像中沥青裹覆面积比、控制系数、团聚指数及变异系数,以沥青拌和后在混合料中的均匀分散性为指标,对其发泡效果进行评价并优选发泡参数。采用Matlab编写相关程序对图像进行处理计算并分析,处理过程及效果如图5所示。

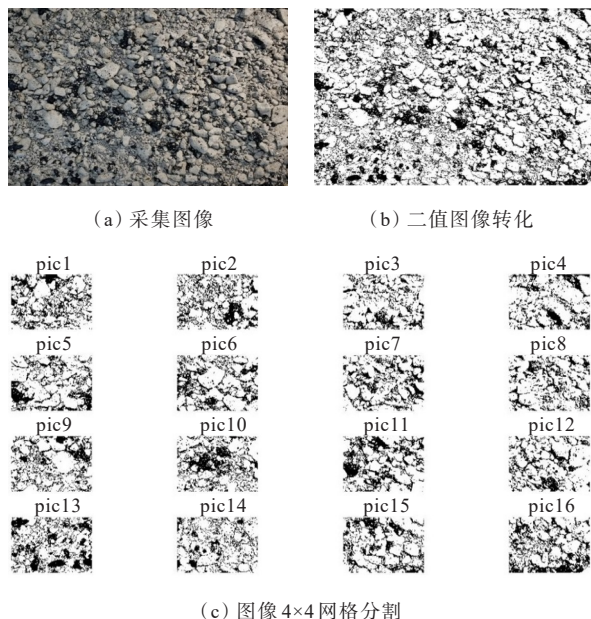


图5 图像处理

Figure 5 Image processing

在不同的温度条件下发泡并与混合料拌和,采集图像对沥青的均匀分散性计算分析,并根据沥青均匀分散性各指标数据,绘制不同发泡温度下的关系曲线,如图6所示。

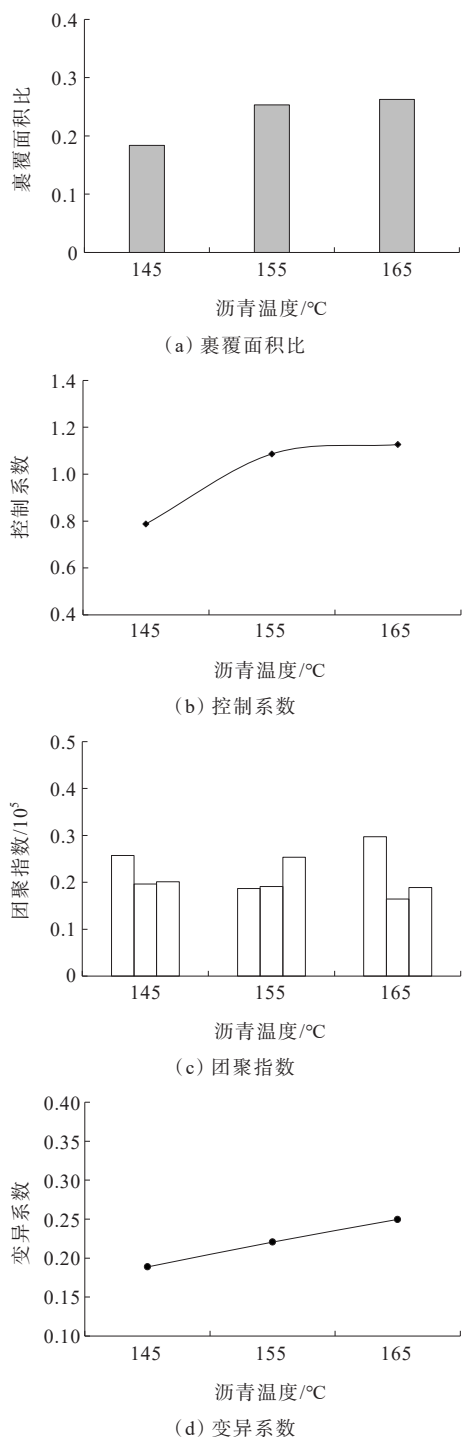


图6 不同沥青温度下的均匀分散性

Figure 6 Uniform dispersion of asphalt at different temperatures

由图6可以看出:

(1) 145℃时所取样品中沥青裹覆面积比较其他

两组小,且控制系数为0.79,偏差明显。由于每组试验中泡沫沥青用量是固定不变的,若沥青拌和均匀,理论上所计算出的沥青裹覆面积占比之间应相差不大,此时控制系数也接近于1。而145℃下该组试验中沥青裹覆面积比及控制系数均过小,同时,样品中沥青较少也意味着取样后剩余混合料中所含的沥青较多。因此145℃温度下样品与整体的偏差较大,可认为该组试验沥青分散均匀性较差,而155℃和165℃下的效果较为接近,分散性更好。

(2) 3组沥青温度拌和试验下的沥青团聚指数基本接近,图像进行4×4网格划分后计算的变异系数 $C_{v145℃} < C_{v155℃} < C_{v165℃}$ 。通过对每幅图像截取3处沥青团聚位置进行计算,3处团聚指数总体较小且较为平均,则沥青分散更均匀;对图像网格划分后计算沥青裹覆率的变异系数,变异系数越小,每个图像网格中所含沥青量的差异越小,代表分散越均匀。试验结果中虽然145℃时变异系数较小,但是其裹覆面积比偏差较大,与其他两组不在同一水平,对比失去意义。根据图像处理后的计算,综合对比团聚指数和变异系数,沥青温度155℃时均匀分散效果略好于165℃。

采用不同的发泡用水量,对沥青发泡后与混合料进行拌和,采集图像并计算分析均匀分散性,并根据沥青均匀分散性各参数数据,绘制变化规律曲线,如图7所示。

由图7可以看出:

(1) 发泡用水量由1.5%增加到3.0%,试验采集图像中沥青的裹覆面积比分别为0.3424、0.2531、0.2884、0.2714,经计算得出的控制系数分别为1.19、0.88、1.00、0.94。用水量1.5%条件下控制系数达到了1.19,裹覆面积比明显偏大,与其他3组偏差明显。而在2.0%、2.5%、3.0%条件下,沥青裹覆面积比、控制系数较为接近,反映出样品与整体较为一致,沥青拌和的均匀性较好。

(2) 对比各发泡用水量拌和试验后的团聚指数 $I_{AI}$ 及变异系数 $C_v$ ,沥青在图像中的分布均匀性排序为: $I_{AI}(1.5\%) < I_{AI}(3.0\%) < I_{AI}(2.0\%) < I_{AI}(2.5\%)$ 。用水量1.5%时,3个团聚位置处团聚指数均偏大,在图像中的表现为局部沥青团聚成块,该条件下沥青未拌和均匀,导致变异系数也较大。用水量为2.0%~3.0%时,由均匀性指标结果的对比可知,用

水量在 2.5% 时沥青的团聚指数最小且较平均,而且经过计算图像分割后的变异系数也最小,可认为此条件下沥青在混合料中的分散效果最佳。

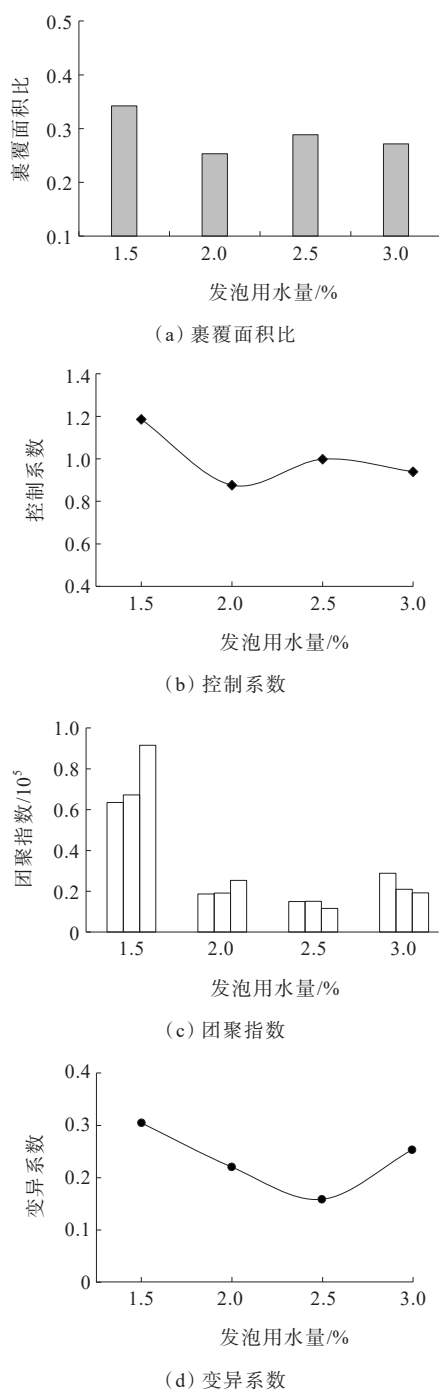


图7 不同发泡用水量下的均匀分散性

Figure 7 Uniform dispersion of asphalt under different water consumption for foaming

## 4 结论

(1) 基于数字图像处理技术,对拌和后的泡沫沥青混合料进行图像采集,并进行图像转化、网格分割

等操作处理计算,对泡沫沥青效果进行了评价,通过定量计算进行判定,方法简单快捷、易于实施。

(2) 提出了沥青裹覆面积比 $\sigma$ 、控制系数 $M$ 、团聚指数 $I_{AI}$ 和变异系数 $C_v$ 等均匀分散性参数控制指标,并优选了最佳沥青温度、发泡用水量等发泡参数。

(3) 综合对比沥青温度、发泡用水量两个因素变化时,拌和试验后泡沫沥青在混合料中的均匀分散性,最终可得出最佳发泡参数为沥青温度 155℃、发泡用水量 2.5%,此条件下的发泡效果最好。

## 参考文献:

## References:

- [1] 王清洲,徐大伟,黄家麒,等.泡沫沥青冷再生技术节能减排效益测算[J].环境工程,2018,36(6):179-183.  
WANG Qingzhou, XU Dawei, HUANG Jiaqi, et al. Energy saving and emission reduction benefit evaluation of cold recycling technology with foam asphalt[J]. Environmental Engineering, 2018, 36(6): 179-183.
- [2] 李鹏飞,韩占闯.泡沫沥青就地冷再生混合料力学性能影响因素研究[J].中外公路,2019,39(2):260-264.  
LI Pengfei, HAN Zhanchuang. Factors affecting the mechanical properties of cold recycled mixture of foamed asphalt[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(2): 260-264.
- [3] 付涛.旧沥青路面冷再生混合料性能研究[J].中外公路,2018,38(6):263-269.  
FU Tao. Research on performance of cold recycled mixture in old asphalt pavement[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 263-269.
- [4] 孙建勇,王德群,张海峰,等.泡沫沥青冷再生路面材料疲劳性能研究及寿命分析[J].公路,2020,65(11):66-69.  
SUN Jianyong, WANG Dequn, ZHANG Haifeng, et al. Study on fatigue performance and life analysis of foamed asphalt cold recycling pavement materials[J]. Highway, 2020, 65(11): 66-69.
- [5] 徐金枝,郝培文.沥青发泡性能评价指标及优化设计研究[J].建筑材料学报,2011,14(6):776-780,802.  
XU Jinzhi, HAO Peiwen. Research on the evaluation index and optimization design of asphalt foaming characteristics [J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(6): 776-780, 802.
- [6] 冯逸,张诚,陈永云.灰色关联理论在泡沫温拌沥青生产关键参数优选中的应用研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2014,31(2):119-123.  
FENG Yi, ZHANG Cheng, CHEN Yongyun. The

- optimization studies of foam warm mix asphalt production critical parameter based on gray relative theory[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2014, 31(2): 119-123.
- [7] 于泳潭. 基于水稳拌合站的泡沫沥青冷再生技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- YU Yongtan. Research on cold recycling technology with foamed bitumen based on cement stabilization mixing plant[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [8] 黄维蓉, 任海生. 基于非接触式方法的沥青发泡评价指标研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(9): 43-47.
- HUANG Weirong, REN Haisheng. Evaluation index of foamed asphalt based on non-contact method[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(9): 43-47.
- [9] 徐金枝. 泡沫沥青及泡沫沥青冷再生混合料技术性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- XU Jinzhi. Technical performance of foamed asphalt and foamed asphalt cold recycled mix[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [10] 杜镇宇, 梁乃兴, 赵毅. 数字图像技术分析沥青路面均匀性的方法[J]. 中外公路, 2017, 37(5): 62-66.
- DU Zhenyu, LIANG Naixing, ZHAO Yi. Method for analyzing uniformity of asphalt pavement by digital image technology[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37(5): 62-66.
- [11] 张莹莹, 刘飞, 黎晓. 基于数字图像技术的沥青路面变异系数相关性评价及预测[J]. 中外公路, 2021, 41(6): 82-86.
- ZHANG Yingying, LIU Fei, LI Xiao. The correlation evaluation and prediction of variation coefficient of asphalt pavement based on the digital image technology[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(6): 82-86.
- [12] 李升连, 梁乃兴, 曾晟. 采集方法对数字图像沥青混合料离析评价影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 103-107.
- LI Shenglian, LIANG Naixing, ZENG Sheng. Influence of acquisition methods on segregation evaluation of digital image of asphalt mixture[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(3): 103-107.
- [13] 赵宾, 申爱琴, 郭寅川, 等. 基于发泡机种类的泡沫沥青及其混合料性能研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 252-257.
- ZHAO Bin, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Effect of laboratory foamer on asphalt foaming characteristics and foamed mixture properties[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(2): 252-257.
- [14] 赵品晖, 韩科超, 时敬涛, 等. 沥青组成结构对沥青表面能的影响研究[J]. 山东建筑大学学报, 2017, 32(5): 435-441.
- ZHAO Pinhui, HAN Kechao, SHI Jingtao, et al. Effects of composition structure of asphalt on its surface energy[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2017, 32(5): 435-441.
- [15] 黄维蓉, 任海生. 沥青发泡机理及发泡效果评价指标研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(6): 36-41.
- HUANG Weirong, REN Haisheng. Foaming mechanism of asphalt binders foamed and evaluating index of foaming effect of foamed binders[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(6): 36-41.
- [16] 李强, 陈浩, 张帅. 沥青发泡特性及其影响因素研究[J]. 公路工程, 2019, 44(6): 62-65, 70.
- LI Qiang, CHEN Hao, ZHANG Shuai. Foaming characteristics and factors of asphalt binders[J]. Highway Engineering, 2019, 44(6): 62-65, 70.