

# 高黏乳化沥青砂封层的配合比设计研究

孙雅珍<sup>1</sup>, 潘嘉伟<sup>1</sup>, 迟凤霞<sup>2</sup>, 郭政<sup>1</sup>, 顾彬诚<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 浙江交通职业技术学院, 浙江 杭州 311112)

**摘要** 目的 对高黏乳化沥青砂封层的配合比设计进行研究,使高黏乳化沥青砂封层技术广泛地应用到实际工程中. 方法 先制备6种不同固含量和恩格拉黏度的乳化沥青样品,再利用 Meclod 法计算出乳化沥青和机制砂的理论洒布量并根据试验确定机制砂的单一级配粒径. 通过脱石率试验、抗滑性能试验、砂封层渗水性能等试验对理论洒布量进行调整,综合试验所得结果和实际施工中的相关影响因素. 结果 高黏乳化沥青砂封层的配合比宜选用固含量为70%,恩格拉黏度为10的乳化沥青样品,洒布量为 $1.1 \text{ kg/m}^2$ ,机制砂选用 $2.36 \sim 4.75 \text{ mm}$ 单一粒径集料,洒布量宜为 $6.7 \text{ kg/m}^2$ . 结论 通过试验最终得到了高黏乳化沥青砂封层的最佳配合比,为工程实践研究提供了理论数据.

**关键词** 高黏乳化沥青砂封层;脱石率;抗滑性能;抗渗性能;配合比设计

中图分类号 TU378;U441

文献标志码 A

## Research on Mix Design of High Viscosity Emulsion Asphalt Sand Seal

SUN Yazhen<sup>1</sup>, PAN Jiawei<sup>1</sup>, CHI Fengxia<sup>2</sup>, GUO Zheng<sup>1</sup>, GU Bincheng<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Zhengjiang Institute of Communications, Hangzhou, China, 311112)

**Abstract:** For the extensive application of the high-viscosity-emulsion-asphalt-sand-seal technology, the mix design is studied. Firstly, 6 samples of emulsified asphalt with different viscosities and solid content are made. Secondly, Meclod method is used to calculate the theory spraying amount of emulsified asphalt and the machine-made sand, then the single particle size grading mechanism of sand is determined according to the experiment. Based on this, the theoretical spray amount is adjusted through the stone-off-rate test, anti-sliding performance test and sand-sealing test. Finally, combined with the test results and actual construction experience, the mix design of high-viscosity-emulsion-asphalt-sand seal is given. In the high-viscosity-emulsion-asphalt-sand seal, the solid content of the emulsion asphalt should be 70%, Enge La viscosity is 10 and the spraying amount is  $1.1 \text{ kg/m}^2$ . The single particle size of aggregate of the machine-made is  $2.36 \sim 4.75 \text{ mm}$  and the

收稿日期:2016-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51478276);辽宁省自然科学基金项目(20170540770);辽宁省公路局科研项目(201601);浙江省自然科学基金项目(LY13E080006)

作者简介:孙雅珍(1970—),女,教授,博士,主要从事路面损伤研究.

spraying amount is 6.7 kg/m<sup>2</sup>.

**Key words:**high viscosity emulsion asphalt sand seal;stone off rate test;anti-slide performance;impermeability;mix design

随着我国公路通车里程和使用年限的不断增长,我国公路交通事业开始由快速建设阶段向养护阶段过渡<sup>[1]</sup>.为了有效缓解养护管理工作量快速增加和养护资金缺口巨大带来的压力,提高路网效率,除了加快养护管理体制与养护运行机制改革、加大养护资金的投入外,还必须转变养护管理指导思想、变革养护管理模式,全面调整一些传统的养护观念和习惯做法,使公路养护由被动养护向科学养护转变,由单一养护、粗放型养护向复合型、集约型养护转变,全面推行预防性养护,从而建立起具有主动性、预见性和系统性的公路养护工作体系.目前国内最常用的预防性养护技术就是碎石封层技术<sup>[2]</sup>.

高黏乳化沥青砂封层作为一种预防性养护的技术,以其具有良好的抗渗性能、抗滑性能、耐磨性能、容易施工、耗能少、造价低等优势,在道路工程中正逐渐被推广应用<sup>[3-5]</sup>.但目前对砂封层的结构行为机理还缺乏深入认识,材料组成设计方法还未形成,尤其是没有统一的配合比范围和结论,使得砂封层技术不能广泛应用于实体工程,碎石封层设计时,经常用到的方法有 Mcleod 设计法、英国设计法、澳大利亚设计法、南非设计法等<sup>[6-10]</sup>.对于砂封层的配合比设计,笔者借鉴了碎石封

层配合比设计中常用的 Mcleod 设计法.实体工程施工后,往往会出现一些典型的病害问题,其中多因乳化沥青洒布量相对集料洒布量不恰当引起.但是反过来,可以考虑从实际病害的角度来确定出工程中乳化沥青的最佳用量.在理论计算出的最佳洒布量的基础上,通过室内试验和实际施工中的相关影响因素(裂缝、坑洼)对理论最佳洒布量进行调整,使其更加接近实际情况<sup>[11]</sup>.笔者通过对6种不同固含量和恩格拉黏度  $E_v$  (Enge La Viscosity)的乳化沥青样品的黏结性能、泛油特性、抗滑性能和抗渗性能的评价与对比,综合考虑了经济性和实际施工操作的可行性,最终确定了高黏乳化沥青砂封层的配合比,为实际施工提供有效的指导.

1 原材料的性质

1.1 乳化沥青

乳化沥青的制备所用原材料为辽河 90 号基质沥青、水、乳化剂等.制备过程中,考虑到试验用量并兼顾经济因素,没有采用大型生产设备,而采用了一种高速剪切中型沥青碾磨机.通过改变沥青碾磨机中胶体磨转速,基质沥青和乳化剂用量得到6种不同恩格拉黏度的高黏乳化沥青,技术指标如表1所示.

表1 乳化沥青参数

Table 1 Emulsified asphalt parameters

编号	蒸发残留物 质量分数/%	胶体磨转速/ (r·min <sup>-1</sup> )	恩格拉黏 度 $E_v$	破乳快 慢程度	筛上剩余物 质量分数/%	粒子 电荷	溶解 度/%
1号	55	20	3	慢裂	0.01	阴离子	99.8
2号	65	10	4	慢裂	0.02	阴离子	99.8
3号	65	20	7	中裂	0.01	阴离子	99.7
4号	70	6	10	快裂	0.01	阴离子	99.8
5号	70	8	14	快裂	0.03	阴离子	99.8
6号	70	10	18	快裂	0.05	阴离子	99.8
规范要求	≥50	—	2~10	—	≤0.1	—	≥97.5

1.2 机制砂

机制砂作为乳化沥青砂封层的另一个重要组成部分,是封层结构最主要的承重部分,其下表面与原路面接触,上表面直接承受车辆荷载的作用.笔者根据《建筑用砂》(GB/T14684—2001)选用的集料为石灰岩机制砂,粒径范围选为0~4.75 mm.通过室内试验观察,全级配的机制砂与乳化沥青的黏结不牢固,掉粒现象严重,强度不足,单一粒径的集料可以增加矿料间隙率,有利于沥青填充,可以提高粘接强度<sup>[12]</sup>.因此,将乳化沥青砂封层的粒径范围定在2.36~4.75 mm,技术指标如表2所示.

表2 机制砂主要技术指标

Table 2 Main technical indexes of mechanism sand

项目	松装空隙率 V/%	含泥量/%	毛体积密度 G/(g·m <sup>-3</sup> )	含水率/%
石灰岩机制砂	45.7	3	2.58	1.5

1.3 Mcleod 法计算乳化沥青和机制砂的理论洒布量

砂封层配合比的设计主要是为了计算机制砂和乳化沥青的洒布量,常用的计算方法有经验法和理论法.根据乳化沥青砂封层已有的研究成果,应用Mcleod理论法<sup>[13]</sup>中式(1)确定机制砂的理论洒布量,根据式(2)计算得到6种不同黏度的乳化沥青的理论洒布量<sup>[14]</sup>.

$$C = (1 - 0.4V) \times T_A \times G \times E. \tag{1}$$

式中: $C$ 为机制砂理论撒布量,kg/m<sup>2</sup>;  $T_A$ 为砂封层平均厚度;  $E$ 为损失系数,一般取1.01~1.10. 计算可得机制砂撒布量  $C = 6.7 \text{ kg/m}^2$ .

$$E_{AC} = (0.4 \times T_A \times E_{AC} \times T + S + A) \times \rho \times \frac{W}{R}. \tag{2}$$

式中: $E_{AC}$ 为乳化沥青理论撒布量,kg/m<sup>2</sup>;  $T$ 为交通修正系数,笔者取0.83;  $S$ 为路面状况修正系数,根据规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)取0.2;  $A$ 为集料吸收系数,一般为1%~2%;  $\rho$ 为辽河

90号基质沥青密度,kg/m<sup>3</sup>;  $W$ 为乳化沥青撒布量系数,取0.88;  $R$ 为乳化沥青固含量,%,计算结果如表3所示.

表3 不同黏度的乳化沥青理论洒布量

Table 3 Amount of emulsion asphalt of different viscosity kg/m<sup>2</sup>

编号	机制砂洒布量	理论洒布量	编号	机制砂洒布量	理论洒布量
1	6.7	0.778	4	6.7	0.568
2	6.7	0.597	5	6.7	0.566
3	6.7	0.585	6	6.7	0.549

2 乳化沥青砂封层配合比的试验研究

2.1 乳化沥青砂封层粘结性研究

(1)脱石率试验

机制砂用量选用理论洒布量,即6.7 kg/m<sup>2</sup>.通过改变乳化沥青的洒布量,制作两种材料不同配比的试件,测得试件脱石率随乳化沥青洒布量的变化试验数据,得到脱石率随不同黏度乳化沥青洒布量的变化规律,试验步骤如下:

- ①在温度25℃条件下称取机制砂、乳化沥青质量.
- ②将20 cm×20 cm钢板水平放置,然后用毛刷在其上均匀涂抹乳化沥青.
- ③接着在乳化沥青上方均匀撒布机制砂,撒布完试件,如图1(a)所示.
- ④在试件上方覆盖5 mm厚橡胶垫,再用质量10 kg的钢桶均匀碾压10次.
- ⑤常温静置12 h后(为了使乳化沥青充分破乳),毛刷轻刷钢板上的机制砂,称其质量  $m_1$ ,刷后试件如图1(b)所示.
- ⑥将钢板倒置,放在垫块上,下放托盘,将质量为1 200 g钢球置于距地面50 cm的支架上.后释放钢球,取出托盘,天平称取钢球砸落机制砂质量  $m_2$ .
- ⑦计算脱石率  $\mu$ .

$$\mu = \frac{m_1 + m_2}{268} \times 100\% . \tag{3}$$

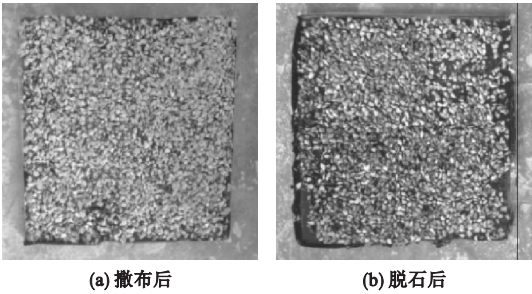


图1 脱石率试验

Fig.1 Stone off rate test

(2) 试验结果及分析

对试验数据进行整理,得到脱石率随不同黏度乳化沥青洒布量的变化曲线如图2所示,横坐标代表各自对应理论洒布量(见表1)的不同倍数.分析可知,不同黏度下,脱石率随乳化沥青洒布量的增大而逐渐减小,但当乳化沥青的洒布量超过某一固定值后,脱石率基本保持不变.

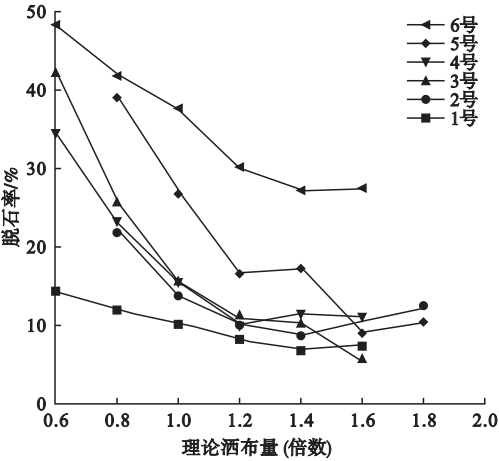


图2 脱石率随洒布量的变化

Fig.2 Stone off rate changes

由图2可以看出,6号样品的最小脱石率仍大于30%,不能满足规范和施工要求.1~5号的最小脱石率分别为7%,8.8%,5.6%,10%,9%.对应的乳化沥青洒布量的倍数为:1.4倍(1.09 kg/m<sup>2</sup>),1.4倍(0.836 kg/m<sup>2</sup>),1.6倍(0.936 kg/m<sup>2</sup>),1.2倍(0.682 kg/m<sup>2</sup>),1.6倍(0.878 kg/m<sup>2</sup>).

3号样品的乳化沥青在洒布量为0.936 kg/m<sup>2</sup>时脱石率达到最低,为5.6%,是所有样品中脱石率最低的,防集料脱落效果最好;4号样品在洒布量为0.682 kg/m<sup>2</sup>就达到最低脱石率10%,乳化沥青用量最低,最经济.对本次试验而言,从粘结效果角度考虑应选用3号样品(固含量65%,E<sub>v</sub>=7),从经济性的角度考虑应选用4号样品(固含量70%,E<sub>v</sub>=10).

2.2 乳化沥青砂封层泛油研究

泛油现象会对试件抗滑性能带来非常不利的影响<sup>[15]</sup>,如果路面出现大面积泛油,由于乳化沥青有很高的黏性,开放交通后,乳化沥青会粘在轮胎上并带走一部分集料,对砂封层造成破坏,因此必须考虑乳化沥青的用量不能超出一定范围.为了砂封层的研究泛油现象,依据《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)制备AC-13沥青混合料车辙板试件,在其上铺设乳化沥青砂封层,然后碾压.将不同乳化沥青砂封层试件每次复压养护结束后的状况记录,限于篇幅,给出了4号样品在1.2倍理论乳化沥青洒布量时的试件复压图,如图3所示.

试件在经过三次碾压,充分养护后,乳化沥青缓慢爬升至机制砂之间的孔隙,并与机制砂发生黏结.与此同时,6种样品随着乳化沥青的爬升,分别在理论洒布量的1.4倍、1.6倍、1.4倍、1.2倍、1.4倍、1.4倍时,经过初压、复压、养护、爬升后表面相继出现了泛油现象.因此,各样品的用量不宜超出泛油试验所确定范围.

2.3 乳化沥青砂封层抗滑性能研究

(1) 试验方案

取脱石率试验中结果较好的5种乳化沥青样品进行抗滑性能试验,在25℃下每组至少测试5个摆值,并且要保证各摆值之差不大于3,最后取平均值作为对应试件的最终摆值,表征其抗滑性能<sup>[16]</sup>.



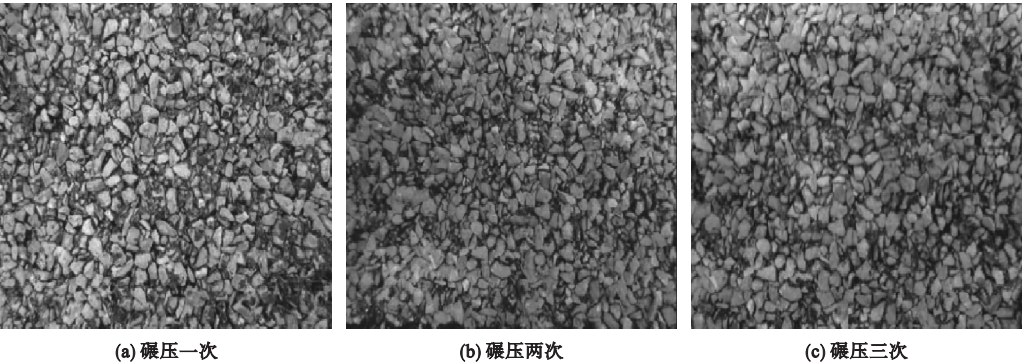


图3 每次碾压后的砂封层表面泛油现象

Fig.3 Surface oil of sand sealing surface after grind

(2) 试验步骤

- ①制备车辙板试件. 依规范《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTGE20—2011)制备 AC13 车辙板试件.
- ②将车辙试件用粗铁丝均分成三部分;
- ③用毛刷将乳化沥青均匀涂抹在车辙试件铁丝网格内,后均匀撒布机制砂;

- ④试件置于轮碾成型机上,标准荷载 9 kN 碾压 5 次.
- ⑤常温下养护 4 h、24 h、48 h 后,再进行 20 次碾压;
- ⑥摆式测定仪放置于已成型的试件上调平,25 ℃ 下测量封层试件摆值,如图 4 所示.



图4 抗滑性能试验

Fig.4 Anti-slip performance test

(3) 试验结果及分析

试验结果如图 5 所示,得到 5 种样品在所对应试件摆值与乳化沥青洒布量的关系.

分析可知,当 5 种样品所对应试件摆值达到最大时,1~5 号样品对应的乳化沥青的洒布量分别为:1.6 倍(1.245 kg/m<sup>2</sup>),1.6 倍(0.955 kg/m<sup>2</sup>),1.8 倍(1.053 kg/m<sup>2</sup>),1.2 倍(0.682 kg/m<sup>2</sup>),1.6 倍(0.906 kg/m<sup>2</sup>),最大摆值分别为:100,99.2,99.2,99.8,101.2.可以看出各样品的摆值基本相同,从经济效果考虑,4 号样品(固含量 70%, $E_v=10$ )最佳.

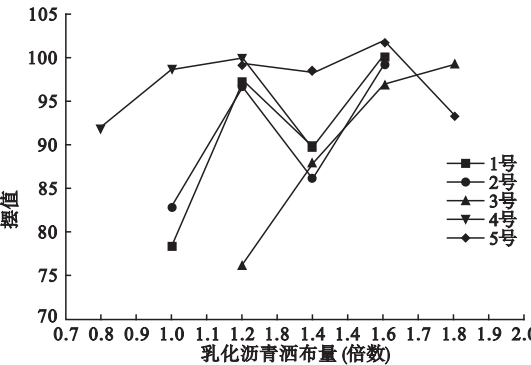


图5 乳化沥青洒布量与摆值关系

Fig.5 Relationship between spray amount and BPN

2.4 乳化沥青砂封层抗渗性研究

2.4.1 渗水试验

为了研究各乳化沥青样品形成的砂封层的抗渗透性,笔者在试验室内将标准车辙试件切割成 10 cm × 10 cm 的正方形试件<sup>[17]</sup>,在其上铺加 1~5 号乳化沥青样品所对应的砂封层,经碾压养护成型后进行渗水试验(见图 6)。

①依规范《公路工程沥青及沥青混合料

试验规程》(JTGE20—2011)制备 AC13 车辙板试件。

②先对机制砂进行洗净烘干处理,后分别将制备的 5 种乳化沥青、机制砂均匀撒布在基层板试件上。

③碾压成型。为使基层板试件和砂封层黏结充分,将试件放置于碾压成型仪上压实。之后,试件常温静置 12 h,待乳化沥青完全破乳,与机制砂充分粘结后,进行下一步骤。

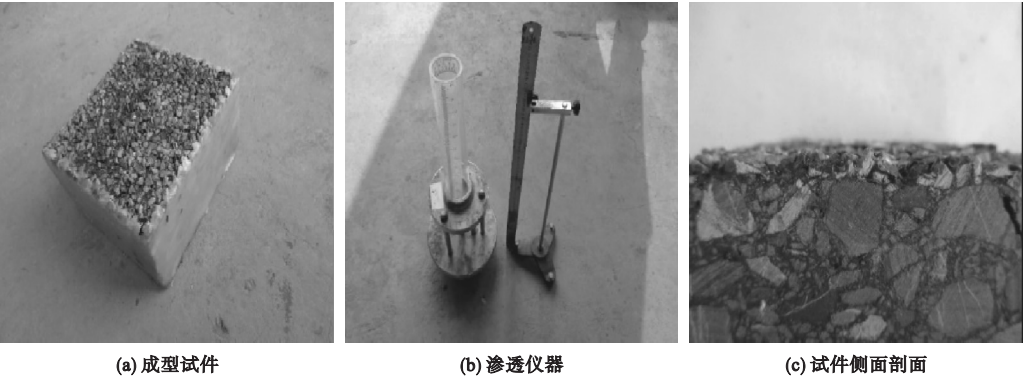


图 6 测量渗水性能的试验装置

Fig. 6 Testing device for water seepage performance

④切割和密封。切割划分为边长 10 cm 正方形试件,用蜡将试件四周封实。

⑤试件水平放置,用拇指宽条状密封带沿试件四边揉压均匀(水管与试件接触面积为 39 cm<sup>2</sup>),后放置渗水仪,确保试件与渗水仪几何中心在同一直线<sup>[18]</sup>。

⑥渗水试验。用烧杯取适量水加入渗水仪,排出气泡,竖尺测得初始水头高度  $h_1$ ,后启动秒表,开始计时。3 min 后,记录水头高度  $h_2$ 。

⑦求渗水系数  $K$ <sup>[19]</sup>。

$$K = \frac{\alpha \cdot L}{A \cdot t} \ln \frac{h_1}{h_2} \tag{4}$$

式中: $a$  为渗水仪水管截面积; $L$  为试件高度; $A$  为试件横截面面积; $t$  为试验经过时间; $h_1$  为计时开始时水头高度; $h_2$  为计时结束时水头高度。

2.4.2 试验结果及分析

渗水系数与乳化沥青洒布量的关系如图 7 所示。

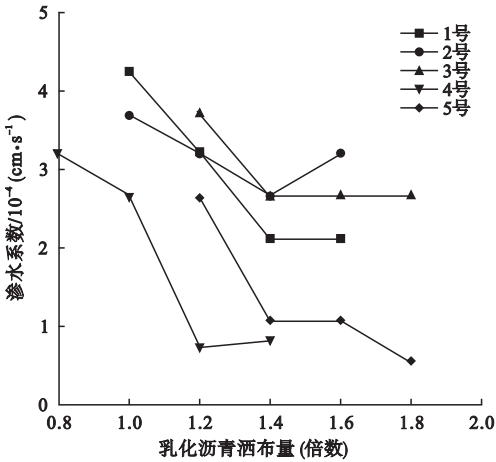


图 7 渗水系数与沥青洒布量的关系

Fig. 7 Relationship between spray amount and water permeability coefficient

由图 7 可以得出,5 种样品所对应砂封层的最小渗水系数分别为: $2.12 \times 10^{-4}$  cm/s,  $2.65 \times 10^{-4}$  cm/s,  $2.65 \times 10^{-4}$  cm/s,  $0.72 \times 10^{-4}$  cm/s,  $0.53 \times 10^{-4}$  cm/s,所对应的乳化沥青洒布量分别为 1.4 倍(1.089 kg/m<sup>2</sup>),

1.4 倍( $0.836 \text{ kg/m}^2$ ), 1.4 倍( $0.819 \text{ kg/m}^2$ ), 1.2 倍( $0.682 \text{ kg/m}^2$ ), 1.8 倍( $1.019 \text{ kg/m}^2$ ). 就本次试验从抗渗的角度考虑设计砂封层应选用 5 号样品(固含量 70%,  $E_v = 14$ ), 如果以经济性为优先考虑因素宜选用 4 号样品(固含量 70%,  $E_v = 10$ ).

### 3 结 论

(1) 泛油试验中, 6 种样品分别在理论洒布量的 1.4 倍、1.6 倍、1.4 倍、1.2 倍、1.4 倍、1.4 倍时, 经过初压、复压、养护后表面出现了泛油现象, 因此理论设计用量不宜超出上述范围.

(2) 脱石率试验中, 3 号样品(固含量 65%,  $E_v = 7$ )有最小的脱石率 5.6%, 但对应乳化沥青用量为理论洒布量的 1.6 倍( $0.936 \text{ kg/m}^2$ ), 泛油现象明显, 不能用于施工. 4 号样品(固含量 70%,  $E_v = 10$ )在理论洒布量的 1.2 倍( $0.682 \text{ kg/m}^2$ )时就达到最低脱石率 10%, 乳化沥青用量最低, 最经济.

(3) 抗滑试验中, 虽然最大摆值相差不大, 但 1 号~5 号样品最大摆值所对应的用量分别为理论洒布量的 1.6 倍、1.6 倍、1.8 倍、1.2 倍、1.6 倍, 除了 4 号样品外, 其余都超出了泛油试验确定的最大用量. 另外, 4 号样品(固含量 70%,  $E_v = 10$ )用量也是最低的, 因此宜选用 4 号样品.

(4) 渗水试验中, 5 号样品(固含量 70%,  $E_v = 14$ )的渗水系数最小时所用乳化沥青是理论洒布量的 1.8 倍, 也超出了泛油试验所允许的用量. 同样, 4 号样品(固含量 70%,  $E_v = 10$ )在理论洒布量的 1.2 倍时渗透系数最小, 综合比较 4 号样品最佳.

(5) 乳化沥青砂封层宜选用固含量为 70%、恩格拉黏度为 10 的乳化沥青, 洒布量应为理论洒布量的 1.2 倍( $0.682 \text{ kg/m}^2$ ). 需要注意的是求得的乳化沥青洒布量范围是在试验室理想状况下进行的, 在实际路面的摊铺过程中会遇到很多问题, 最为突出有两

个: 实际路面是存在裂缝的, 而试验室摊铺乳化沥青是在平整度很高且没有裂缝的车辙板试件上进行的; 施工过程中提供的机制砂没有经过清洁处理, 矿粉含量很高. 机制砂中的矿粉含量对路面的泛油现象和砂封层配合比设计有很大影响. 而试验室中的机制砂是经过严格水洗烘干处理的. 鉴于以上两点原因, 需要对上述已经确定好的乳化沥青洒布量进行优化设计, 应乘以一个 1.5 倍的优化系数. 因此, 在 25 °C 条件下, 高黏乳化沥青砂封层的配合比宜选用固含量为 70%, 恩格拉黏度为 10 的乳化沥青样品, 洒布量为  $1.1 \text{ kg/m}^2$ , 机制砂选用 2.36~4.75 mm 单一粒径集料, 洒布量宜为  $6.7 \text{ kg/m}^2$ .

### 参考文献

- [1] 李扬. 基于可持续发展理论的我国公路交通发展模式研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.  
(LI Yang. Study on road transport development model based on sustainable development theory [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015.)
- [2] 孙行营. 改性乳化沥青同步碎石封层技术在沥青混凝土路面预防性养护中的应用[J]. 公路, 2013, 10: 219-223.  
(SUN Xingying. The application of modified emulsified asphaltic rock sealing layer technology in precautionary curing of asphalt concrete pavement[J]. Highway, 2013, 10: 219-223.)
- [3] LONG Guangcheng, MA Kunlin, LI Zhe, et al. Self-compacting concrete reinforced by waste tyre rubber particle and emulsified asphalt[J]. Sustainable construction materials, 2012 (6): 92-104.
- [4] SUN Yazhen, ZHAI Xiaoxing, YU Baoyang. Finite element analysis of geosynthetics retarding damage of AC trabecula[C]. New York: IEEE, 2012.
- [5] 任炜. 同步碎石封层技术在沥青路面预防性养护中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2013 (5): 161.  
(REN Wei. The application of the synchronous gravel seal technique in the preventive maintenance of asphalt pavement [J]. Heilongjiang communications science and technology, 2013 (5): 161.)

- [6] ALKASAWNEH W, PAN E, GREEN R. The effect of loading configuration and footprint geometry on flexible pavement response based on linear elastic theory [J]. Road materials & pavement design, 2008, 9(2): 159 - 179.
- [7] ALAM T B. Laboratory characterization of recycled asphalt pavement as a base layer [J]. International journal of pavement engineering, 2010, 11(2): 123 - 131.
- [8] GUTHRIE W S. Cement stabilization of aggregate base material blended with reclaimed asphalt pavement [J]. Transportation research record, 2007(2026): 47 - 53.
- [9] KIM S. Performance of polymer-modified asphalt mixture with reclaimed asphalt pavement [J]. Transportation research record, 2009(2126): 109 - 114.
- [10] FERNANDO M N, CAMEN R C. Influence of crumb rubber on the indirect tensile strength and stiffness modulus of hot bituminous mixes [J]. Journal of materials in civil engineering, 2012(24): 715 - 724.
- [11] 覃峰. 同步碎石封层脱石率的试验研究 [J]. 路基工程, 2008, 140(5): 111 - 112.  
(QIN Feng. The experimental study of the rate of rock removal in synchronous rock [J]. Subgrade engineering, 2008, 140(5): 111 - 113.)
- [12] BUONSANTI M, LEONARDI G. A finite element model to evaluate airport flexible pavements response under impact [J]. Applied mechanics & materials, 2011, 138/139: 257 - 262.
- [13] RYAN E F, PETER W J, JUI-CHENG H, et al. Vitamin D receptor controls expression of the anti-aging klotho gene in mouse and human renal cells [J]. Biophysical research communications, 2011, 414(3): 557 - 562.
- [14] 杨育生, 李振霞, 王选仓, 等. 桥面铺装同步碎石防水黏结层的路用性能 [J]. 长安大学学报, 2009, 9(6): 19 - 23.  
(YANG Yusheng, LI Zhenxia, WANG Xuan-cang, et al. Road performance of synchronous crushed stone water proof binding course of bridge pavement [J]. Journal of Chang'an university (natural science edition), 2009, 9(6): 19 - 23.)
- [15] BOARDMAN J H, MEYER M D, SKINNER R E, et al. Chip seal best practice [R]. Washington: Transportation Research Board, 2005.
- [16] 李兵. 同步碎石应力吸收层技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.  
(LI Bing. Study on stress-absorbing interlayer of the synchronous pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.)
- [17] 郭玉伟. SBS 改性乳化沥青用于同步碎石上封层的研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2012.  
(GUO Yuwei. Research on the up-seal synchronous pavement with SBS modified emulsified asphalt [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.)
- [18] 于伟. 半柔性基层沥青路面结构的力学特性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.  
(YU Wei. Study on mechanical properties of semi-flexible base asphalt pavement structure [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.)
- [19] 孙雅珍, 翟晓星, 李宁. 沥青路面反射裂缝扩展机理与防裂效果分析 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2012, 28(6): 1023 - 1029.  
(SUN Yazhen, ZHAI Xiaoxing, LI Ning. Analysis on propagation mechanism of asphalt pavement reflective crack and anti-cracking effect [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2012, 28(6): 1023 - 1029.)