

# 水泥混凝土桥面铺装抗泛白性能评价方法及影响因素研究

李宁博<sup>1</sup>,郝培文<sup>1\*</sup>,王雨谨<sup>2</sup>,胡小金<sup>3</sup>

(1.长安大学公路学院,陕西西安 710000;2.中国市政工程西北设计院有限责任公司,陕西西安 710000;

3.陕西路桥集团有限公司,陕西西安 710054)

**摘要:**该文分析不同泛白现象产生的原因,并确定气压差为主要的泛白驱动力。采用自行设计沥青混合料“临界气压差试验”分析不同压实方式以及级配类型下沥青混合料的抗泛白性能,并提出“临界气压差”“2 kPa下开始唧浆时间”和“2 kPa下、3 min唧浆量”可以有效评价沥青混合料抗泛白性能。结果表明:压实方式上沥青混合料抗泛白性能排序为:旋转压实成型、马歇尔击实成型、轮碾成型;级配设计上 SMA 抗泛白性能优于 AC,并且集料粒径越大,抗泛白性能越优。

**关键词:**沥青混合料;泛白现象;压实方式;临界气压差;开始唧浆时间;唧浆量;抗泛白性能;改善措施

**中图分类号:**U444

**文献标志码:**A

## 0 引言

中国目前水泥混凝土桥面铺装使用较多的是沥青混合料。而水泥混凝土桥面铺装出现一种严重的早期病害泛白。沥青混合料上面层施工完成后,在尚未通车阶段,一场雨过后,能在面层观察到明显的泛白现象。针对泛白现象,张岱<sup>[1]</sup>认为泛白物质为水泥层中的碱性物质被水溶解后,通过结构层内部连通空隙迁移至表面,并与空气中的CO<sub>2</sub>反应生成白色或黄色的碳酸盐类物质;汪印龙<sup>[2]</sup>从施工角度分析了泛白现象,并猜测其驱动力为高温造成水分蒸发所引起的气压差;张强<sup>[3]</sup>提出毛细迁移作用促使浆液唧出。采用ISAT试验对比了泛白芯样与未泛白芯样毛细吸水情况,对比发现泛白芯样毛细吸水能力明显大于未泛白芯样。通过CT扫描发现芯样的毛细吸水能力与其总空隙率并无直接关系,大空隙数量的增多将会阻断毛细吸水路径;芯样的毛细吸水系数与毛细空隙比(毛细空隙率与大空隙率比值)线性

相关性较好;常睿<sup>[4]</sup>针对未通车桥面泛白情况,采用Abaqus有限元软件模拟分析了水分-荷载-温度耦合作用下桥面铺装与沥青路面结构内的毛细水压力、孔隙水压力,通过鼓泡加压试验分析了不同压实状态下铺装层混合料的抗液性能,并与毛细吸水试验比较,进一步分析不同因素对桥面铺装层混合料抗泛白性能的影响。研究发现:相比路面结构,桥梁结构内温差变化更大,温度相对于路面更高,相对应的毛细水压力更大。并提出基于鼓泡加压试验和毛细吸水试验(ISAT)的未通车沥青铺面泛白评价方法。

国内外对于水泥基饰面材料泛白性能评价已经有了相应的标准:美国ASTM C67标准<sup>[5]</sup>采用目视法作为泛白程度评价标准,该方法规定了一个固定的尺寸距离和环境要求,观察者如果在此条件下,观察到表面色度差异,则判别为发生了泛白;英国<sup>[6]</sup>采用浸泡法对试件进行加速泛白试验,试验完成后采用目视法对泛白程度进行判别,此外还要结合试件吸水量、可溶性盐含量及水分迁移等参数对试件进行综合评价确定其抗泛白性能。

收稿日期:2022-08-02

基金项目:陕西省交通运输厅2017年度交通科研项目(编号:17-07K)

作者简介:李宁博,男,博士研究生.E-mail:5743786620@qq.com

\*通信作者:郝培文,男,博士,教授.E-mail:hpwasphalt@vip.qq.com

中国《墙体饰面砂浆》(JC/T 1024—2007)<sup>[7]</sup>中采用滴水法加速泛白,试验完成后采用目视进行判别。《砌墙砖试验方法》(GB/T 2542—2012)<sup>[8]</sup>中采用浸没法加速泛白,也采用目视法判别泛白性能,并将泛白程度分为四个等级。目视法判断精准性低,误差大。此外,张星<sup>[9]</sup>基于图像分析软件Image-ProPlus6.0提取出了试件表面的泛白面积,采用了泛白面积占试件表面总面积的百分比作为泛白评价标准,该方法操作简单,误差较小;王培铭<sup>[10]</sup>定义了砂浆表面碱浸出率这一概念,并将此作为砂浆泛白程度评价指标,该指标可准确反映水泥基材料泛白性能,但该参数获取困难,成本高;刘晋艳等<sup>[11]</sup>采用泛白物质称重法作为评价标准评价普通水泥混凝土与高性能混凝土的泛白性能,该方法虽然比较直观,但泛白物质在刮取过程中影响因素多,结果误差较大。

虽然有学者研究桥面铺装的泛白现象成因及其影响因素和评价方法。但是国内外学者少有对通车状况下,水泥混凝土桥面沥青铺装层泛白现象提出简便、有效并应用于工程中的评价方法,亦少有对于未通车时水泥混凝土桥面沥青铺装层泛白现象提出工程施工的改进措施。

本文针对桥面铺装沥青混合料的抗泛白性能,采用自行设计“临界气压差试验”评价沥青混合料抗泛白性能并提出相应抗泛白性能改善措施。其结果对于预防中国水泥混凝土桥面沥青铺装的泛白早期病害具有重要的工程价值。

## 1 抗泛白性能评价试验

### 1.1 泛白物质

对于水泥混凝土桥面铺装泛白现象,张岱<sup>[1]</sup>对收集泛白物质并采用化学滴定发现,泛白物质主要由水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中 $\text{CO}_2$ 产生的 $\text{CaCO}_3$ 组成。大量研究表明水泥基材料表面也会发生泛白现象,且泛白物质主要是水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{CaCO}_3$ 。因此,判定泛白物质来源为铺面和防水黏结层下层的水泥混凝土层中的水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与空气中 $\text{CO}_2$ 产生的 $\text{CaCO}_3$ 。

### 1.2 泛白驱动力

沥青混合料结构中,水以液态水和气态水进行迁移,液态水在多孔介质中的迁移方式主要分为3种:

扩散迁移、毛细作用迁移及渗透作用迁移,气态水迁移驱动力为蒸发作用。因此结合水分迁移途径和水泥基材料泛白机理,提出以下4种沥青混合料泛白机理。

(1) 蒸发作用。当水分渗入或流入沥青混合料结构底部时,水泥混凝土表面的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 等物质溶解在水分中,并随着水分蒸发至铺装层表面,气态水冷凝,泛白物质析出形成泛白。

(2) 扩散作用。当水分充满整个连通空隙时,在防水黏结层破坏或者薄弱区,底部的泛白物质溶于水中,并在浓度差的驱动下向上扩散至沥青混合料表面。表面水分蒸发后,泛白物质析出残留在表面,从而产生泛白。

(3) 毛细作用迁移。当水分未充满连通空隙时,水分在连通空隙中发生毛细作用,从而携带泛白物质迁移至表面,在表面蒸发后将泛白物质残留在沥青混合料表面,形成泛白。

(4) 气压差驱动。水分未充满连通空隙,由于雨后放晴,沥青铺装层外部温度、湿度等与结构内部不同,从而产生内外气压差,在气压差的驱动下,液态水携带 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CaCO}_3$ 等物质沿着内部连通空隙迁移至沥青铺装层表面,待液态水蒸发后形成泛白。

基于以上对沥青混合料表面泛白机理的分析,本文设计4种驱动力下的泛白试验。

### 1.3 泛白驱动力试验

#### 1.3.1 蒸发作用下的泛白驱动力试验

蒸发作用主要是气态水在饱和蒸气压作用下蒸发,并携带泛白物质迁移,本文选取空隙率为4%和8%的AC-13马歇尔试件进行试验,步骤如下:①采用环氧树脂将试件侧面进行密封处理;②待表面环氧树脂固化完成后放入40℃的烘箱中干燥24h;③准备一个直径为60cm、高度为50mm的金属开口容器,内部放置10mL饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液;④将试件采用环氧树脂黏结在容器上,并将试件表面采用马克笔涂黑;⑤待环氧树脂固化后将试件放置在设定温度下进行蒸发试验,观察表面泛白现象。

在进行标准马歇尔试件蒸发试验之前,先将空隙率为4%和8%的试件放置在最高温度为200℃的高温电炉上进行加速试验,试验环境温度为25℃。试验如图1所示,图中a、b为试验开始前,c为试验刚结束的空隙率为4%的试件,d为表面水分蒸发后空隙率为8%的试件。

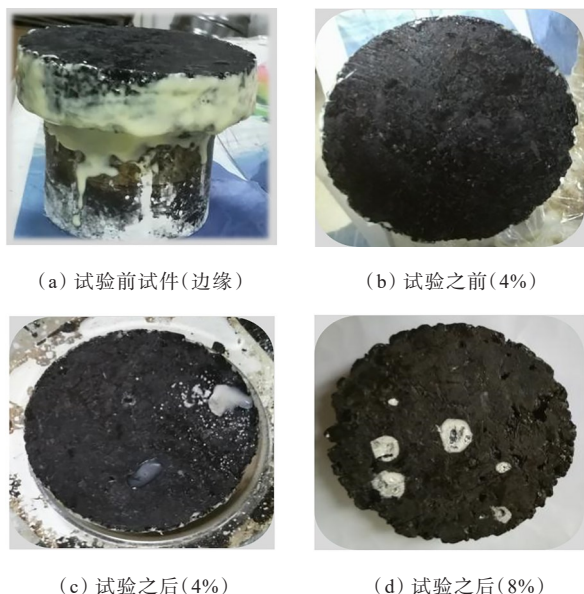


图1 蒸发试验图

从图1可以看出:空隙率为4%和8%的试件表面均观察到泛白现象,且4%试件泛白处主要在试件外围,而8%试件在表面出现较为严重的泛白现象,其分布相对均匀。

在加速试验的基础上,结合实际铺装层温度情况<sup>[8]</sup>,本文对AC-13马歇尔试件进行蒸发试验,将下端开口容器部分浸在40℃的水浴箱中进行蒸发试验,室温为25℃。48 h后,空隙率为4%和8%的试件组表面均未观察到泛白现象。将试件放置在60℃烘箱中加热至软化,沿高度方向切开试件,观察内部孔结构中是否含有 $\text{Ca}^{2+}$ ,结果如图2所示。

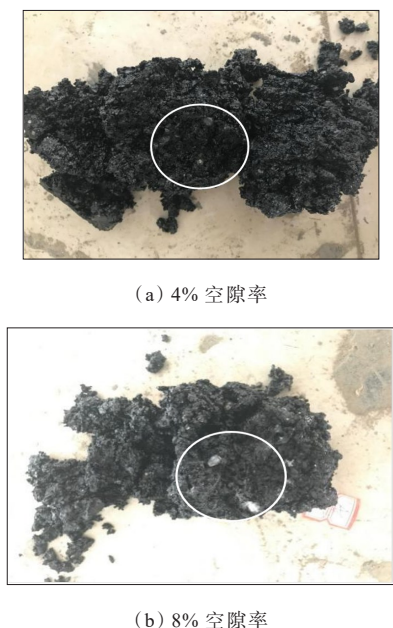


图2 不同空隙率试件内部情况

图2表明:对于不同空隙率的沥青混合料,水分蒸发作用会导致泛白物质在内部向上迁移,但空隙率较小的试件内部泛白物质运输高度明显小于空隙率较大的试件,说明空隙率越大,水分蒸发作用导致的物质迁移越剧烈。

综上所述,虽然在短时间内水分蒸发试验中没有观察到表面泛白,但是水分蒸发作用可以携带泛白物质向上迁移。

### 1.3.2 扩散作用下的泛白驱动力试验

制备空隙率为4%和8%的两组AC-13标准马歇尔试件,进行泛白物质扩散试验,试验步骤如下:① 准备一个直径14 cm、高度为15 cm的开口容器,在底部中心钻取直径为8 cm的孔;② 将试件放于步骤①准备的容器中,并保证试件底部中心与容器底部中心对齐,采用环氧树脂将试件侧面与容器黏结,防止水分和泛白物质从试件侧面流出,在25℃环境中放置24 h,待环氧树脂完全固化;③ 采用沥青混合料理论密度仪将试件进行饱水处理;④ 将处理完毕的试件放置在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 饱和溶液中,水面高于试件底部1 cm,试件底部放置几段剪开的胶条,保证底部与水分充分接触;⑤ 在试件表面洒布10 mL水,以确保试件处于充分饱水状态,表面有足够的水分用于测量pH值;⑥ 将试件分别放置在25℃、40℃,湿度为60%的环境中48 h,采用pH计观察表面pH值变化情况。

图3为空隙率为4.0%和8.0%试验前后表面pH值变化图。

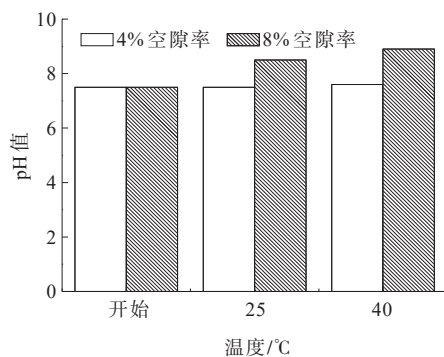


图3 扩散试验pH值变化

由图3可知:在25℃、40℃情况下,空隙率为8%的试件观察到表面pH值变化,在时间一致的条件下,40℃变化程度大于25℃,说明水分扩散程度随温度的升高而加大,但两种温度下待表面水分蒸发后



均未观察到泛白现象;图3中空隙率为4%的试件在温度为25℃、40℃的情况下pH值几乎没有变化,说明4%空隙率的沥青混合料并不存在可供液态水迁移的连通空隙, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 无法向上迁移至表面。

以上试验表明:当沥青混合料具有供液态水迁移的连通空隙时,扩散作用可以携带泛白物质迁移至沥青混合料表面,且温度升高有利于泛白物质在水分中的扩散,空隙率大的沥青混合料扩散作用更剧烈。

### 1.3.3 毛细作用下的泛白驱动力试验

制备空隙率为4%和8%的两组AC-13沥青混合料标准马歇尔试件。将试件四周采用环氧树脂密封,待环氧树脂固化后,将试件放在40℃烘箱中烘干,之后取出试件冷却至室温,然后将试件表面采用马克笔涂黑,放在装有饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液的盘中,溶液高出试件底部2cm,底层铺设几段剪开的胶条,保证试件下表面可以充分地与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液接触。将试件放置在25℃、40℃,湿度为60%的环境中,观察表面泛白现象。试验需要及时地更换 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液,保证溶液内部 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 浓度不变且溶液高度不变。

连续观测48h后发现25℃和40℃温度下两组空隙率试件表面均未发现泛白。将试件放入60℃烘箱中加热至软化,沿高度方向切割,并观察试件内部是否含有 $\text{Ca}^{2+}$ ,5d后25℃情况下不同空隙率试件的内部情况如图4所示,40℃情况下不同空隙率试件的内部情况如图5所示。

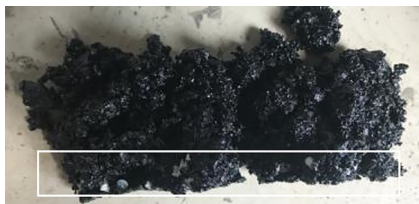


(a) 4%空隙率试件

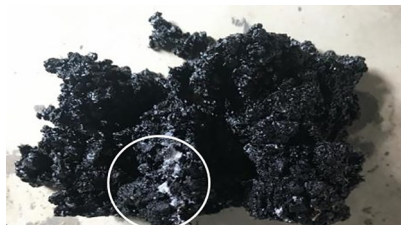


(b) 8%空隙率试件

图4 5d后不同空隙率试件内部情况(25℃)



(a) 4%空隙率试件



(b) 8%空隙率试件

图5 5d后不同空隙率试件内部情况(40℃)

图4、5表明:毛细作用可以携带泛白物质在沥青混合料内部向上迁移,但25℃和40℃下4%空隙率的试件其泛白物质上迁高度均小于8%空隙率的试件,且25℃下两组空隙率试件的泛白物质上迁高度均小于40℃下试件内部泛白物质的上迁高度,该现象说明水分可以通过毛细作用运输 $\text{Ca}^{2+}$ ,且其运输能力还受到内部连通空隙、温度等因素影响。

### 1.3.4 气压差作用下的泛白驱动力试验

根据泛白现场观察发现,未通车前泛白产生时间为夏季时分,雨过天晴,温度骤升的时候。相关气象资料显示大雨过后大气压通常高于正常状况下气压,而随着温度急剧上升气压降低。因此本文推定由于雨天时水分进入桥面结构层中,水泥混凝土表面 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等泛白物质溶解在其中,雨天后桥面结构内部气压增大,当温度骤升后,铺装层表面气压随大气气压迅速降低,而结构内部气压变化较慢,依然保持高压的状态,铺装层内外形成气压差,浆液在内外气压差的驱动下沿着铺装层的连通孔道唧出,形成泛白现象。为了验证这一推论,本文对不同温度、湿度下的气压进行了测定。

采用传感器测量西安夏季连续两天大气气压变化情况,每1min记录一次,为使气压图清楚,本文仅展示每30min一次的测试结果,如图6所示。

由图6可以看出:每天的气压呈现周期性变化,在晚上18:00—早晨08:00,气压呈现逐渐上升趋势,在08:00—09:00气压最高,随后,气压开始出现下降,17:00左右气压最低,两者之间相差最高达0.6kPa。

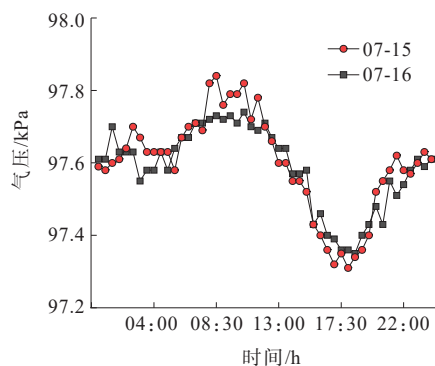


图 6 气压时程图

本文测试的两天均未出现明显的天气变化,早晚气温相差  $10^{\circ}\text{C}$  左右,在此种天气情况下每天气压差高达  $0.6\text{ kPa}$ ,在夏季暴雨前后气压差值会更大。因此,本文设计气压差试验研究气压差作用下的桥面铺装泛白现象。

#### 1.4 气压差试验装置

泛白试验装置主要由气泵、试验容器和控制表盘组成,装置示意图如图 7 所示。试验容器底部中心设有直径为  $80\text{ mm}$  的孔,顶部采用胶圈加有机玻璃密封,在顶部中心通过一条管子与真空泵连接,在容器顶部边缘安装压力传感器。采用环氧树脂将试件黏结在容器内部,保证试件与容器黏结处实现密封,将容器顶部盖上,并施加一定压力,实现上顶部密封。打开真空泵之后,容器内部空气被抽出,改变了试件上部的气压,而与外界相接区域气压不变,从而实现试件上下压差。

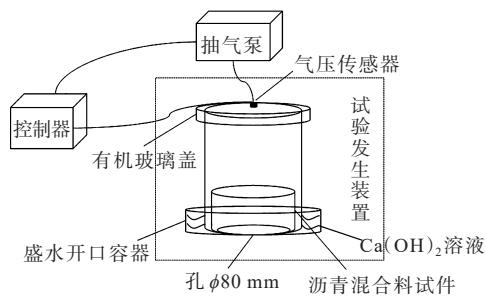


图 7 试验装置示意图

##### 1.4.1 试验步骤

(1) 将试件四周采用环氧树脂密封,确保水分不会从侧面迁移。

(2) 待环氧树脂完全固化后,将试件用环氧树脂黏结在容器底部,下表面对准容器底部的孔,保证溶

液只能通过试件向上迁移。

(3) 待环氧树脂固结后,将容器放在底座的开口容器中,开口容器内装有一定量的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  饱和溶液,底部放置几段胶条,保证容器底部一直与溶液完全接触,液面高出容器底部  $2\text{ cm}$ ,溶液暴露在大气中。

(4) 封闭容器顶部,开始抽气,并观察试件表面,记录试件顶底部压力差、试件吸水量、唧浆时间和唧浆量等。

(5) 对试件进行工业 CT 扫描,观察空隙结构。

##### 1.4.2 12 h 泛白现象

实际工程中,沥青铺面水分迁移驱动力随着温度、湿度等外界因素的变化而变化,因此本文研究了  $12\text{ h}$  实际环境变化下空隙率为  $4\%$ 、 $6\%$ 、 $7\%$  的沥青混合料泛白现象。试验从早上  $07:00$  开始,持续至晚上  $19:00$ 。通过气压传感器连接电脑记录大气气压,并参考前一天气压变化范围设置容器内部气压为  $97.5\text{ kPa}$  恒定值,每隔  $1\text{ h}$  测定一次试件吸水量。 $12\text{ h}$  大气压如图 8 所示,各组试件吸水量如图 9 所示,待试验完成后,将试件放置于  $40^{\circ}\text{C}$  烘箱中,  $12\text{ h}$  后取出,各组试件表面泛白情况如图 10 所示,从左至右试件空隙率依次为  $4\%$ 、 $6\%$ 、 $7\%$ 。

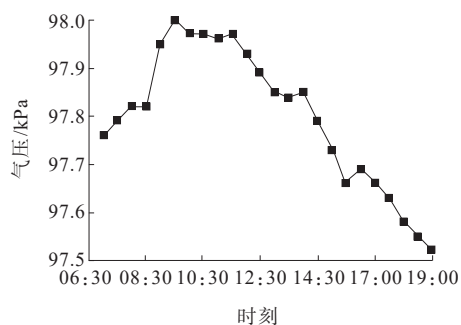


图 8 12 h 内气压时程图

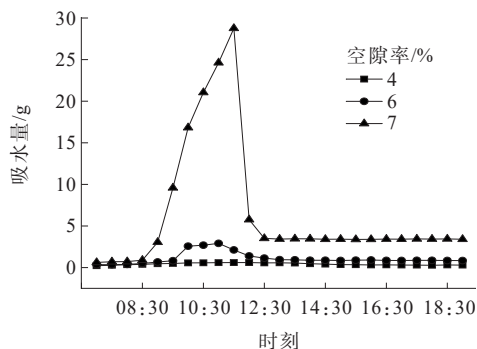


图 9 吸水量时程图



图10 不同空隙率沥青混合料泛白情况

从图9中可以看出:空隙率为4%的沥青混合料试件吸水量很小,且在试验过程中并未观察到任何泛白现象,试验完成后表面也无泛白;6%空隙率的试件总体吸水量较小,在09:30—11:00时间段吸水量持续增加,出现泛白现象,此外,在试验中发现当气压差减小时水分存在下渗现象;当气压差减小至某一值时,7%空隙率的沥青混合料表面出现泛白的位置均存在不同程度的浆液下渗现象,且下渗现象在最早出现泛白的位置处最明显。这是由于当空隙率增加到一定程度,混凝土内部出现了大孔径连通孔道,导致唧出的水量很容易从这些大孔径连通孔道中下渗。

全天候的沥青混合料泛白试验表明:气压差、蒸发作用、扩散作用、毛细作用四者综合影响下,沥青混合料会在不受行车荷载作用下产生泛白现象,即水泥混凝土桥面沥青铺装层泛白为铺装层上下气压差、水分蒸发作用、离子浓度扩散作用、水分毛细作用共同导致,且主要驱动力为气压差。在试验中发现吸水量并不能很好地表征沥青混合料的抗泛白性能,例如4%空隙率的试件存在吸水量,但并未发现泛白现象,这是由于各因素综合作用并未达到该空隙率出现泛白现象所需的唧出条件,所驱动的水分只运输到结构内部,并未迁移至表面。综上所述,还需对气压差泛白试验进行进一步研究,提出相应的评价指标。

#### 1.4.3 试验评价指标

定气压差泛白试验主要用于研究沥青混合料在定气压差下的实际泛白情况,其适用范围较小,仅可用于评价可产生泛白现象的沥青混合料抗泛白性能,且主要采用实际的泛白现象数据作为评价指标,与实际工程中沥青混合料抗泛白性能更为贴合。“开始唧浆时间”可以很好地表征试件最易泛白的连通空隙泛白难易程度,而“唧浆量”可用于表征试件整体连通空隙泛白严重程度。对比不同气压差下沥青混合料泛白试验发现:在实际极端气压差下,试件表

面虽可以观察到明显的泛白现象,但出现泛白的时间较长,而2 kPa气压差下各试件之间开始唧浆时间与唧浆量对比明显,误差较小,更易获取,缩短了试验时间,且取3 min的唧浆量可以一定程度上减小开始唧浆时间对唧浆量的影响,当空隙率较大时也可以获取。因此设定气压差泛白试验的气压差为2 kPa,唧浆量获取时间为3 min。不同压实度下沥青混合料具有不同的空隙率,其内部连通空隙率、孔径大小、弯曲程度等均有所差异。在气压差等作用驱动下对水分迁移的阻隔能力不尽相同,因此产生泛白现象所需气压差也不同。本文将30 s内产生泛白现象所需的气压差定义为泛白临界气压差,判断沥青混合料在某一气压差下是否会产生泛白现象。

综上所述,本文在25℃下采用沥青混合料“临界气压差试验”和“3 min内2 kPa定压差泛白试验”,并采用“临界气压差”检测是否会产生泛白现象,采用“2 kPa下开始唧浆时间”检测沥青混合料泛白难易程度,采用“2 kPa下、3 min唧浆量”作为沥青混合料泛白严重程度评价指标。

## 2 抗泛白性能试验材料指标

### 2.1 原材料

本文采用SBS改性沥青,其技术指标满足相关规范的技术要求。集料采用10~20 mm、5~10 mm、3~5 mm三档粗集料和0~3 mm细集料,其中10~20 mm和5~10 mm两档粗集料为闪长岩,3~5 mm粗集料和0~3 mm细集料为玄武岩,所采用的填料为石灰岩矿粉。集料与矿粉符合《公路工程集料试验规程》(JTG E42—2005)要求。

### 2.2 级配

参照《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)<sup>[12]</sup>,AC-13、AC-16、AC-20、SMA-13沥青混合料级配曲线如图11所示。

### 2.3 最佳油石比

采用马歇尔击实法,各级配体积指标如表1所示,其中SMA-13最佳纤维掺量为0.3%。

## 3 试验方案设计

试验方案如表2所示。



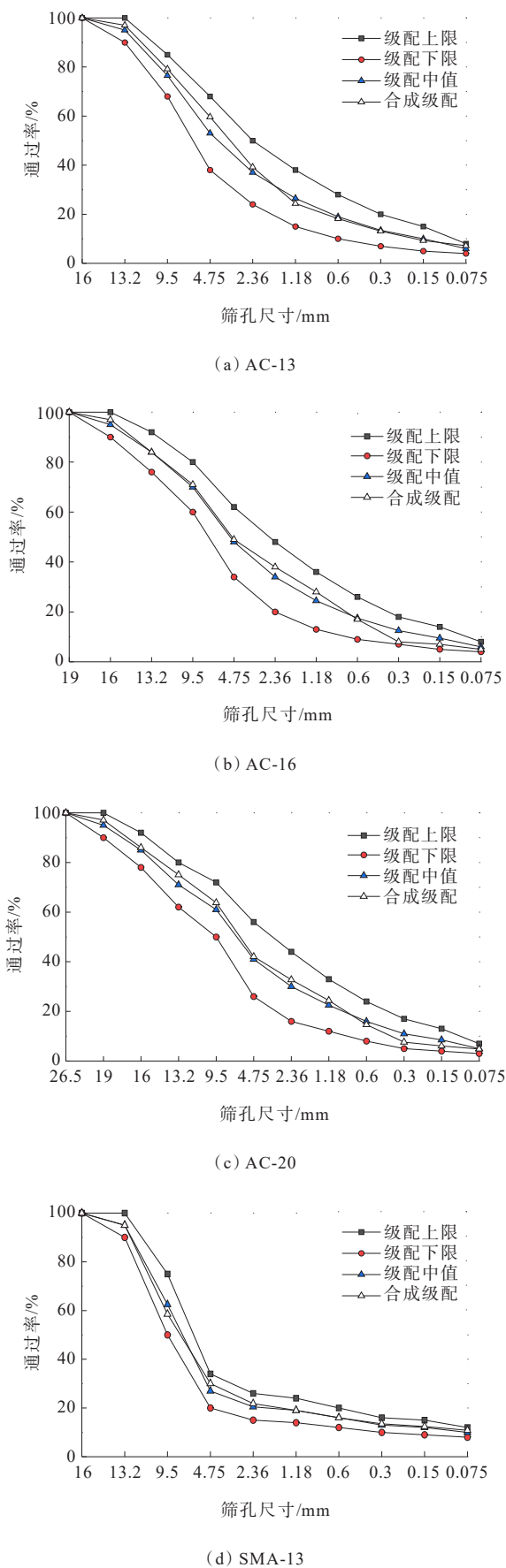


图 11 级配曲线

表 1 AC-13、AC-16、AC-20、SMA-13 体积参数

级配类型	最佳油石 比/%	毛体积相 对密度	空隙率/ %	矿料间 隙率/%	饱和度/ %
AC-13	4.9	2.756	3.98	14.73	73.47
AC-16	4.7	2.759	3.98	15.26	74.78
AC-20	4.2	2.779	4.01	14.53	73.72
SMA-13	6.0	2.673	3.89	17.86	76.44

表 2 试验方案

项目	试验方案
压实方式	旋转压实、轮碾压实、马歇尔击实成型, 试验温度为 25℃、试件底部无防水黏结层
级配类型	AC-13、AC-16、AC-20、SMA-13 四种级配类型, 试验温度为 25℃, 试件底部无防水黏结层

## 4 试验结果及分析

### 4.1 不同级配类型的抗泛白性能

张强<sup>[3]</sup>采用 ISAT 试验对比了泛白芯样与未泛白芯样毛细吸水情况, 发现泛白芯样毛细吸水能力明显大于未泛白芯样。通过 CT 扫描发现芯样的毛细吸水能力与其总空隙率并无直接关系。大空隙数量的增多将会阻断毛细吸水路径。从细观上说明毛细吸水能力与泛白现象有一定关联, 与空隙率的关系不大。但是, 雨天后桥面结构内部气压增大, 当温度骤升后, 铺装层表面气压随大气气压迅速降低, 而结构内部气压变化较慢, 依然保持高压的状态, 铺装层内外形成气压差。所以, 从宏观上, 由于气压差的作用, 沥青混合料的空隙率与泛白现象之间的关联性需要进一步验证。

选取 AC-13、AC-16、AC-20、SMA-13 四种级配类型的标准小型马歇尔试件, 对比其抗泛白性能并采用控制压实度控制空隙率, 各级配类型沥青混合料的空隙率与临界气压差关系如图 12、13 所示, 空隙率与开始唧浆时间关系如图 14 所示, 空隙率与唧浆量关系如图 15 所示。

由图 12~15 的试验结果可知:

(1) 随着空隙率增大, AC-13、AC-16、AC-20、SMA-13 沥青混合料临界气压差逐渐减小, 开始唧浆时间缩短, 唧浆量增大。

(2) 由图 13 可以发现: 集料最大公称粒径增大, 临界气压差出现下降, 说明集料最大公称粒径越大, 越容易出现泛白现象; 各级配类型对应的临界空隙

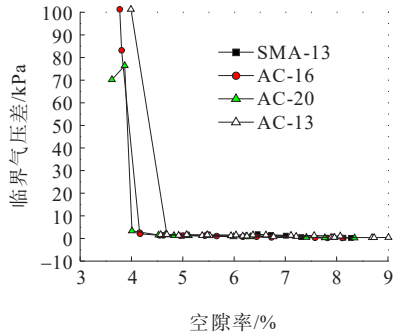


图12 不同级配类型空隙率与临界气压差关系图

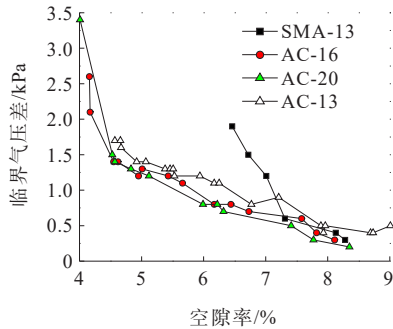
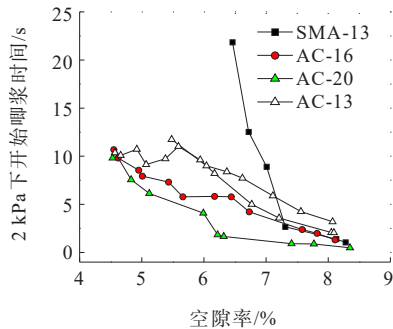
图13 不同级配类型空隙率与临界气压差关系图  
(4.0%~9.0%局部放大)

图14 不同级配类型空隙率与开始唧浆时间关系图

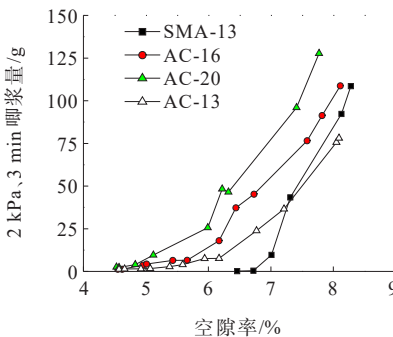


图15 不同级配类型空隙率与唧浆量关系图

率转折点分别是4.5% (AC-13)、4.4% (AC-16)、4.2% (AC-20)、6.5% (SMA-13), 得出集料最大公称粒径越大, 沥青混合料内部越易出现连通空隙, SMA类沥青混合料比AC类更难出现连通空隙; 当空隙率

小于7.5%时, 相同空隙率下SMA-13的临界气压差大于AC-13的临界气压差, 但当空隙率大于7.5%时, SMA-13临界气压差更小, 说明当空隙率较小时, 骨架密实型结构不易产生泛白现象, 但空隙率较大时, 骨架密实型具有更多的连通空隙; SMA类的临界气压差随空隙率变化幅度大于AC类沥青混合料, 且AC-13、AC-16、AC-20的临界气压差随空隙率变化幅度差别不大, 说明在空隙率较大时, SMA类沥青混合料的泛白难易程度对压实度变化更敏感, 而泛白难易程度对压实度的敏感性与沥青混合料结构类型更相关。

(3) 当集料最大公称粒径增大时, 开始唧浆时间缩短, 沥青混合料泛白难易程度越小; SMA-13的开始唧浆时间随空隙率变化幅度明显大于AC类。

(4) 相同空隙率下, 随着集料最大公称粒径的增大, 唧浆量增大; 集料最大公称粒径越大, 唧浆量随空隙率变化的幅度越大, 泛白严重程度越大; SMA-13唧浆量随空隙率增长幅度大于AC-13, 内部更易出现连通空隙。

#### 4.2 不同成型方式对抗泛白性能影响

对比分析旋转压实、轮碾压实、马歇尔击实3种成型方式下沥青混合料(AC-13)的抗泛白性能。图16为不同成型方式下试件空隙率与临界气压差的关系图, 图17为不同成型方式下不同压实度试件空隙率与开始唧浆时间的关系图, 图18为不同成型方式下不同压实度试件空隙率与唧浆量的关系图。

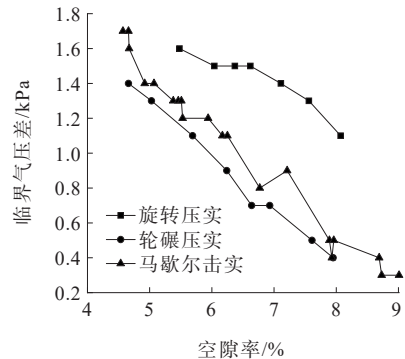


图16 不同成型方式下临界气压差与空隙率关系图

由图16~18可得:

(1) 3种压实方式下空隙率与沥青混合料抗泛白性能各项评价指标关系趋势相同, 均为随着空隙率在3.5%~8%范围内增大, 临界气压差逐渐减小, 开始唧浆时间缩短, 唧浆量增大。



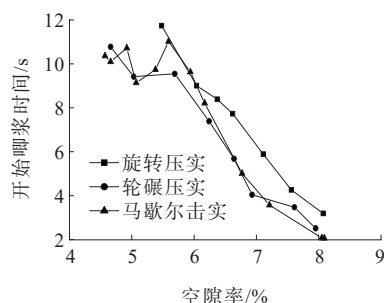


图 17 不同成型方式下开始唧浆时间与空隙率关系图

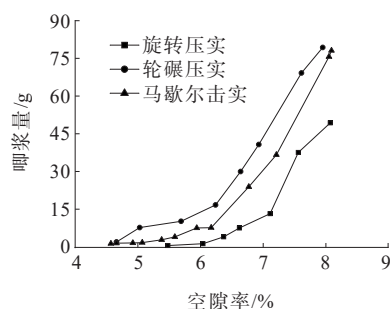


图 18 不同成型方式下唧浆量与空隙率关系图

(2) 对比 3 种成型方式对临界气压差的影响发现:3 种成型方式下相同空隙率试件的临界气压差大小为:旋转压实>马歇尔击实>轮碾压实。

(3) 对比 3 种成型方式下开始唧浆时间发现:当空隙率小于 6% 时,3 种成型方式下沥青混合料的开始唧浆时间相差不大,但当空隙率大于 6% 时,旋转压实下的开始唧浆时间明显大于其他两种成型方式,而马歇尔击实与轮碾成型下的开始唧浆时间相差较小。

(4) 对比 3 种成型方式下唧浆量发现,相同空隙率下唧浆量大小排序为:轮碾压实>马歇尔击实>旋转压实;在试验过程中发现,旋转压实试件在空隙率大于 7% 时,浆液唧出的位置较多,且在试件表面分布较不均匀[图 19(a)]。轮碾压实试件浆液唧出位置分布比较随机[图 19(b)],而马歇尔击实试件泛白位置较少,且周围居多[图 19(c)]。3 种成型方式下沥青混合料的泛白状态表明,旋转压实连通空隙位置及孔径分布较为均匀,轮碾压实下的连通空隙位置分布并无规律,马歇尔连通空隙多分布在四周,且连通空隙孔径分布不均匀。

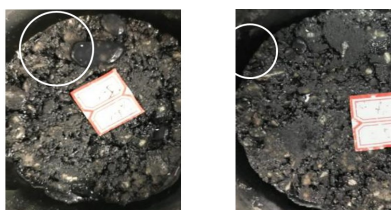
相关学者采用工业 CT 扫描得到<sup>[13-14]</sup>旋转压实成型的沥青混合料内部空隙结构更复杂,连通空隙率最小,且连通空隙位置和孔径分布较为均匀,不易出现大孔径连通空隙;轮碾压实成型的沥青混合料内部水分流动通道较为简单,连通空隙率较大且位置



(a) 旋转压实试件



(b) 轮碾成型试件



(c) 马歇尔成型试件

图 19 试件表面泛白现象

分布随机;马歇尔击实成型的沥青混合料内部连通通道弯曲度等与轮碾法差别不大,但连通空隙率大,多在四周分布,较易出现大孔径连通空隙。

结合不同成型方式下 CT 扫描结果分析其泛白结果,主要是由于旋转压实将细集料更多地聚集在试件中部,虽然整体测量的空隙率较大,但中部细集料多,连通空隙少,将上下之间的连通空隙阻隔开,导致从上至下的连通空隙并不多,且弯曲度大;此外,旋转压实为揉搓压实,压实度沿横向较为均匀,且横向上细集料在粗集料内部镶嵌较为均匀,因此连通空隙位置和孔径都比较均匀;轮碾压实试件为车辙板中心钻芯取样,中心与四周压实度相差不大,但细集料镶嵌均匀度不及旋转压实,导致连通空隙分布较为随机;马歇尔击实为锤击,四周压实度不及中心,因此四周连通空隙分布较多。

## 5 沥青铺装层抗泛白性能改善措施

根据对不同级配类型沥青混合料抗泛白性能的研究,提出 SMA-13 沥青混合料现场空隙率不应大于 7.0%,AC-13 沥青混合料现场空隙率不应大于 6%,AC-16 沥青混合料现场空隙率不应大于 5.5%,AC-20 沥青混合料现场空隙率不应大于 5%。而且

SMA类沥青混合料相比AC类具有更优的抗泛白性能,且在空隙率相对较大的情况下也不会产生泛白现象,因此在结构选取时应尽量采用SMA类沥青混合料。随着集料最大公称粒径的增大,抗泛白性能变差,因此桥面沥青铺装应尽量选取小粒径混合料,但还应注意与其他使用性能综合考虑。

此外,根据不同成型方式下沥青混合料的抗泛白性能研究发现,旋转压实下的沥青混合料具有更好的抗泛白性能。由于桥面结构的特殊性,在面层初次压实时不可采用大振幅振动压路机,而振荡压路机在工作时滚轮与沥青混合料之间为连续接触,不离开沥青混合料,自身振动也较小,因此不会对桥梁结构及沥青混合料造成破坏。振荡压路机在碾压时采用的是振动与揉搓相结合的压实方式,由于其揉搓作用使得滚轮与沥青混合料之间形成一个剪应力,从而对沥青混合料起到揉压的作用,具备胶轮压路机的优点。因此,在实际沥青铺装层施工时推荐采用振荡压路机对沥青混合料层进行初次碾压,采用胶轮压路机进行复压及终压。此外,对于压实机械的参数选择还需根据实际工程进行确定。

## 6 结论

(1) 本文设计“临界气压差”试验并提出“2 kPa下开始唧浆时间”“2 kPa下、3 min唧浆量”指标。

(2) 对上述指标进行分析得出:旋转压实成型下的沥青混合料抗泛白性能最优;其次是马歇尔击实成型的沥青混合料,轮碾成型的沥青混合料抗泛白性能最差。

(3) 分析级配对抗泛白性能的影响得出:集料公称最大粒径越大,沥青混合料抗泛白性能越差。SMA类沥青混合料抗泛白性能优于AC类。

(4) 在沥青铺装层施工中,推荐采用振荡压路机对沥青混合料层进行初压,采用胶轮压路机进行复压及终压。在沥青混合料材料设计上,推荐选取小

粒径沥青混合料。

### 参考文献:

- [1] 张岱.桥面或路面“泛白”现象斑块产生的原因及防范措施探索[J].建筑工程技术与设计,2014(36):439-440.
- [2] 汪印龙.浅谈水泥混凝土桥面沥青铺装层渗水泛白防治与处理[J].城市建设理论研究(电子版),2015(20):460-461.
- [3] 张强.水泥混凝土桥面沥青铺装唧浆与鼓泡评价方法研究[D].西安:长安大学,2017.
- [4] 常睿.耐久性沥青路面材料性能及结构设计研究[D].西安:长安大学,2018.
- [5] ASTM C67, Certified laboratory clay brick testing[S]. America standard.
- [6] EN 771-1, Specification for masonry units[S]. British standard.
- [7] 北京建筑材料科学研究总院有限公司,建筑材料工业技术监督研究中心.墙体饰面砂浆:JC/T 1024—2007[S].北京:中国建材工业出版社,2007.
- [8] 西安墙体材料研究设计院,中国建材检验认证集团西安有限公司.砌墙砖试验方法:GB/T 2542—2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
- [9] 张星.干粉砂浆泛碱抑制研究[D].北京:北京工业大学,2008.
- [10] 王培铭,朱绘美,张国防.水泥砂浆表面碱浸出率表征泛白程度的研究[C]//中国硅酸盐学会房材分会,中国建筑学会建筑材料分会,中国硅酸盐学会水泥分会.第五届全国商品砂浆学术交流会议论文集(5th NCCM).北京:化学工业出版社,2013:156-161.
- [11] 刘晋艳,田钰靖,巩天真,等.普通混凝土和高性能混凝土泛碱试验研究[J].中北大学学报(自然科学版),2017,38(2):243-248.
- [12] 交通部公路科学研究所.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.
- [13] MASAD E, BUTTON J W. Unified imaging approach for measuring aggregate angularity and texture[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2000,15(4):273-280.
- [14] MASAD E, JANDHYALA V K, DASGUPTA N, et al. Characterization of air void distribution in asphalt mixes using X-ray computed tomography[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002,14(2):122-129.