

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.08.003

# 水泥和乳化沥青含量对水泥乳化沥青混合料性能的影响

庄伟, 王健, 陈赛, 陈昊  
(山东省交通规划设计院, 山东 济南 255000)

**摘要:** 为了研究水泥和乳化沥青含量对水泥乳化沥青混合料的性能影响, 对不同水泥和乳化沥青掺量的混合料进行了宏观试验和微观观测, 包括间接拉伸强度、抗压强度、回弹模量、拉伸强度比、动态稳定性、最大弯曲应变和 Cantabro 损失。此外, 使用扫描电子显微镜 (SEM) 和计算机断层扫描 (CT) 获得了具有不同材料成分的水泥乳化沥青混合物的细观图像和空隙特征。结果表明: (1) 当水泥含量恒定为 3%, 乳化沥青含量从 6% 增加到 9% 时, 间接拉伸强度、抗压强度和弹性模量先增加后减小。在恒定的乳化沥青含量为 8%, 水泥含量从 0 增加到 4% 时, 间接拉伸强度先增大后减小, 当水泥含量为 3% 时, 抗压强度和回弹模量均达到最大值。水泥的加入可显著提高沥青混合料的高温稳定性和水分稳定性, 但不利于其低温性能。当水泥含量在 2% 和 3% 之间时, 观察到最小的 Cantabro 磨耗。在水泥乳化沥青混合物中, 水泥与沥青破乳后的水分进行反应, AFt 与沥青薄膜交织形成网格结构, 提高了混合物的水分敏感性和高温稳定性, 另外, 在不同水泥和乳化沥青含量的混合料中形成细观空隙结构也将影响机械性能和混合物性能。

**关键词:** 道路工程; 性能宏微观分析; 水泥乳化沥青; 细观图像; 空隙特征

中图分类号: U414.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2020) 08-0015-07

## Influence of Cement and Emulsified Asphalt Contents on Performance of Cement Emulsified Asphalt Mixture

ZHUANG Wei, WANG Jian, CHEN Sai, CHEN Hao

(Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute, Jinan Shandong 255000, China)

**Abstract:** In order to study the influence of cement and emulsified asphalt contents on the performance of cement emulsified asphalt mixture, the macro experiments and micro observations on the mixtures with different cement and emulsified asphalt contents, including indirect tensile strength, compressive strength, resilience modulus, tensile strength ratio, dynamic stability, maximum bending strain and Cantabro loss, are conducted. In addition, by using scanning electron microscopy (SEM) and computed tomography (CT), the microscopic images and void characteristics of cement emulsified asphalt mixtures with different material compositions are obtained. The result shows that (1) When the cement content is constant at 3% and the emulsified asphalt content increases from 6% to 9%, the indirect tensile strength, the compressive strength and the elastic modulus increase at first and then decrease. When the constant emulsified asphalt content is 8% and the cement content increases from 0 to 4%, the indirect tensile strength increases at first and then decreases. When the cement content is 3%, the compressive strength and the rebound modulus both reach the maximum value. (2) The addition of cement can significantly improve the high temperature stability and

收稿日期: 2019-08-05

基金项目: 山东省科技厅项目 (2017BY2094)

作者简介: 庄伟 (1985-), 男, 山东临汾人, 硕士. (3247698@qq.com)

moisture stability of the asphalt mixture, but it is not conducive to its low temperature performance. The smallest Cantabro abrasion is observed when the cement content is between 2% and 3%. (3) In the cement emulsified asphalt mixture, cement reacts with the moisture after asphalt demulsification, and AFt interweaves with the asphalt film to form a grid, which improves the moisture sensitivity and high temperature stability of the mixture. The mesoscopic void structure formed in the mixtures with different cement and emulsified asphalt contents will also affect the mechanical properties and mixture properties.

**Key words:** road engineering; performance macro and micro analysis; cement emulsified asphalt; mesoscopic image; void characteristic

## 0 引言

水泥乳化沥青混合物含有水泥、乳化沥青和骨料,并在常温下混合<sup>[1]</sup>。由于水泥和乳化沥青具有不同的工程性能,因此水泥乳化沥青混合物的性质介于水泥和乳化沥青之间<sup>[2-3]</sup>。

水泥和乳化沥青的含量对水泥乳化沥青混合物的拉伸强度、耐磨性、压缩强度等有着重要的影响。Oruc 等<sup>[4]</sup>研究了水泥乳化沥青混合料的耐磨性模量,得出水泥含量低于 1% 的水泥乳化沥青混合料的弹性模量与热拌沥青的温度相关性。Kavussi 等<sup>[5]</sup>研究了水泥乳化沥青混合料的疲劳性能,确定了不同水泥含量和温度下混合料的疲劳寿命。Nejad 等<sup>[6]</sup>分析了水泥乳化沥青砂浆与磨碎的高炉矿渣 (GGBS) 和硅粉混合后的力学性能和疲劳性能,结果表明,硅粉可以提高混合料的抗压强度和间接拉伸强度。Niazi 等<sup>[7]</sup>研究了添加水泥和石灰后用乳化沥青就地冷再生混合物的性能,研究结果表明石灰的添加改善了混合物的马歇尔稳定性、弹性模量、拉伸强度以及永久变形。

从当前研究现状来看,对水泥乳化沥青混合料的研究主要集中在常规性能和细观结构特征上,水泥和乳化沥青对混合物的性能影响尚未充分量化,缺乏对其他混合物性能的系统研究<sup>[8-10]</sup>。此外,对水泥乳化沥青混合料性能的分析主要基于 SEM 获得的细观图像,尚未对其细观空隙结构进行研究<sup>[11]</sup>。鉴于此,本研究通过在室内试验中改变水泥和乳化沥青含量,系统评价水泥和乳化沥青含量对水泥乳化沥青混合料性能的影响。评估的性能包括间接拉伸强度、压缩强度、弹性模量、水分敏感性、低温弯曲、车辙、Cantabro 磨耗和疲劳测试。通过扫描电子显微镜 (SEM) 和计算机断层扫描 (CT) 获得每种水泥乳化沥青混合物的细观特征和空隙结构,进一步分析和解释混合物性能的变化。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

在实验室制备乳化沥青,主要技术参数见表 1,试验中水泥采用普通的硅酸盐水泥 (32.5R),使用玄武岩作为骨料,其中砂当量为 81.2%;坚固度为 7%;磨光值为 46;洛杉矶磨耗率 22.2%;压碎值为 11.9%。试验中使用的水泥乳化沥青混合物的级配见表 2。

表 1 乳化沥青主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of emulsified asphalt

测试项目	测试结果	规格	测试方法
残留物筛分/%	0.01	≤0.1	ASTM D6933
蒸发残渣含量/%	64.1	≥55	ASTM D6997
残留物的延展性/cm	72.5	≥40	ASTM D6997
存储稳定性 (5 d)/%	2.9	≤5	ASTM D6930

表 2 用于测试的矿物集料级配

Tab. 2 Mineral aggregate gradation used for testing

筛孔尺寸/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过百分率/%	100.0	95.1	80.4	55.5	34.4	21.8	17.4	12.5	10.1	6.7

### 1.2 测试方案

根据现有研究成果<sup>[12-13]</sup>,已经在乳化沥青含量分别为 6%, 7%, 8% 和 9%, 水泥含量为 0%, 2%, 3% 和 4% 情况下对水泥乳化沥青混合料进行过测试,为了分析水泥和乳化沥青含量对混合物性能的影响,试验设计如下:(1)分析在水泥含量为 3% 时不同乳化沥青含量 (6%, 7%, 8% 和 9%) 对混合物性能的影响。(2)分析在乳化沥青含量为 8% 时不同水泥含量 (0%, 2%, 3% 和 4%) 对混合物性能的影响。根据 ASTM C31,在 20 °C 的温度下将试样在室内固化 7 d。每个性能测试评估 4 个试样,并将平均值作为测试结果。

### 1.3 测试方法

#### 1.3.1 机械性能测试

本次试验可通过间接拉伸、压缩和弹性模量测

试来评估水泥乳化沥青混合物的机械性能,分别进行间接拉伸强度试验和抗压强度试验。

在间接拉伸强度试验中,采用 Marshall 试样,每个试样的高度为  $(63.5 \pm 1.3)$  mm,直径为 101.6 mm。试验温度设定在 20 °C,试验遵循标准试验方法,按照 ASTM D6931-17 标准测定沥青混合物的间接拉伸强度 (IDT)<sup>[14]</sup>。

抗压强度试验中,采用直径为 100 mm,高度为 100 mm 的圆柱形进行试验。试验温度设定在 15 °C,试验按照沥青混合料抗压强度的标准试验方法进行 (ASTM D1074-17)<sup>[15]</sup>。

根据试验结果,将抗压强度  $P$  分为 10 个载荷阶段,其中前 5 个载荷阶段 ( $0.1P$ ,  $0.2P$ ,  $0.3P$ ,  $0.4P$  和  $0.5P$ ) 用作试验载荷。试验中每个试样以 2 mm/min 的速率从 0 加载到  $0.1P$ ,并记录试样的变形  $L_1$ 。然后以相同的速率将每个试样从  $0.1P$  释放到 0,并且在结束后 30 s 记录变形  $L'_1$ ,并利用回弹变形  $\Delta L_1$  表示加载和释放时试样变形的差异。其余的载荷即  $0.2P$ ,  $0.3P$ ,  $0.4P$  和  $0.5P$  分别加载到试样上,然后记录加载和释放时试样变形  $L_i$  ( $i = 2 \sim 5$ ),并计算每个载荷的回弹变形  $\Delta L_i$ ,最后根据方程式计算弹性的压缩模量。以第 5 级负载为例,弹性压缩模量为:

$$E' = \frac{4P_5}{\pi d^2} \times \frac{h}{\Delta L_5}, \quad (1)$$

式中,  $E'$  为弹性的压缩模量;  $P_5$  为应用于试样第 5 阶段的载荷值  $0.5P$ ;  $d$  为试样的直径;  $h$  为试样的轴高;  $\Delta L_5$  为第 5 级负载的回弹变形。

### 1.3.2 水分敏感性测试

混合物的水分敏感性可由冻融劈裂试验得到,如式 (2) 所示可通过计算拉伸强度比 (TSR) 指数<sup>[16-17]</sup>来评估混合物的水分敏感性,试验按照沥青混合料、热混沥青的试验方法 (EN 12697-12-2008) 进行。

$$TSR = \frac{R_{T2}}{R_{T1}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $R_{T1}$  为未经历冻融循环的第 1 组试样间接拉伸强度的平均值;  $R_{T2}$  为冻融循环后第 2 组试样的间接拉伸强度的平均值。

### 1.3.3 低温弯曲试验

低温弯曲试验用于评估混合物的低温特性,试样是从车辙板上切下的 250 mm × 30 mm × 35 mm 的棱柱。在万能试验机 (UTM) 中的 3 个点处加载试样,

其中两个枢轴点的距离为 200 mm,试验温度设定为 -10 °C,加载速率为 50 mm/min。由式 (3) ~ 式 (5) 分别计算弯曲拉伸强度  $R_B$ ,梁底部的最大弯曲应变  $\varepsilon_B$  和失效时的弯曲蠕变刚度  $S_B$ 。试验按照公路沥青及沥青混合料试验规范 (JTJ052-2000) 进行。

$$R_B = \frac{3 \times L \times P_B}{2 \times b \times h^2}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_B = \frac{6 \times h \times d}{L^2}, \quad (4)$$

$$S_B = \frac{R_B}{\varepsilon_B}, \quad (5)$$

式中,  $b$  为截面的宽度 (30 mm);  $h$  为截面的高度 (35 mm);  $L$  为枢轴间距 (200 mm);  $d$  为失效时试样的中跨偏转。

### 1.3.4 Cantabro 磨耗试验

Cantabro 磨耗试验<sup>[18]</sup>用于评估混合物在冲击载荷下的抗磨性能,将标准 Marshall 试样 (每侧压实 50 次) 置于水箱中,并控制水箱温度为  $(15 \pm 0.5)$  °C。然后取出试样,称得质量为  $m_0$ ,并对试样进行洛杉矶磨耗试验。洛杉矶磨耗试验设备以 30 ~ 33 转/min 的速度旋转 300 次,在完成测试后称取最大的残留试样质量为  $m_1$ ,然后通过式 (6) 计算 Cantabro 损失。

$$\Delta S = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\%, \quad (6)$$

式中,  $\Delta S$  为沥青混合物的 Cantabro 损失;  $m_0$  为试验前试样的质量;  $m_1$  为试验后残留试样的质量。

## 2 机械性能测试结果

### 2.1 间接拉伸强度

如图 1 (a) 所示为水泥含量为 3% 时,乳化沥青含量对混合物间接拉伸强度的影响,如图 1 (b) 所示为乳化沥青含量为 8% 时,水泥含量对混合物间接拉伸强度的影响。

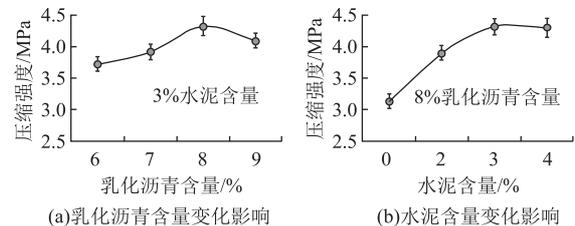


图1 水泥和乳化沥青含量对间接拉伸强度的影响  
Fig. 1 Influence of cement and emulsified asphalt contents on indirect tensile strength

从图1中可以看出,随着水泥和乳化沥青含量的增加,混合物的间接拉伸强度先增大后减小。在水泥含量为3%且乳化沥青含量为8%时,水泥-乳化沥青混合物的间接拉伸强度达到峰值约为0.9 MPa。

## 2.2 抗压强度

水泥和乳化沥青含量对混合物抗压强度的影响如图2所示。当水泥含量为3% (图2(a))时,随着乳化沥青含量的增加,混合物的抗压强度先增加后降低,在乳化沥青含量为8%时最大压缩强度约为4.3 MPa,且水泥含量从0%增加到3%时混合物的抗压强度明显增加(图2(b))。当水泥含量为0%时,混合物的抗压强度约为3.1 MPa。当水泥含量分别为2%和3%时,混合物的抗压强度迅速增加至约3.9 MPa和4.3 MPa。当水泥含量达到4%时,混合物的抗压强度略有下降。

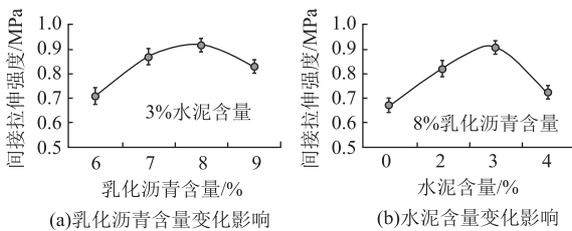


图2 水泥和乳化沥青含量对抗压强度的影响

Fig. 2 Influence of cement and emulsified asphalt contents on compressive strength

## 2.3 弹性模量

图3为20℃时水泥和乳化沥青含量对混合物弹性模量的影响,在水泥含量为3%时,随着乳化沥青含量的增加,弹性模量先增加后降低(图3(a)),在乳化沥青含量为8%时,弹性模量达到峰值约为1120 MPa,且随着水泥含量的增加,水泥乳化沥青混合料的弹性模量逐渐增加(图3(b))。当水泥含量为0%时,弹性模量约为700 MPa;当水泥含量为2%时,弹性模量增加至约960 MPa;当水泥含量达到3%时,弹性模量接近最大值约1150 MPa。

## 3 路用性能测试结果

### 3.1 水分敏感性

图4为混合物在不同乳化沥青和水泥含量下的拉伸强度比(水分敏感性的量度),本次采用冻融劈裂试验来评价水泥乳化沥青混合物的水分敏感性。从图4(a)可以看出,乳化沥青含量的增加导致拉伸强度比的增加,部分是由于骨料被乳化沥青完全

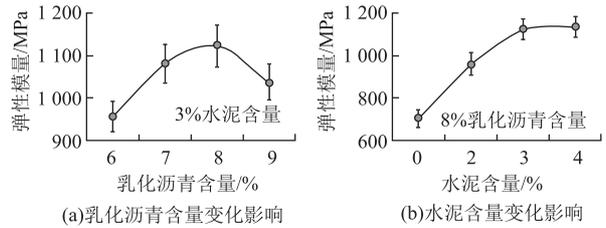


图3 水泥和乳化沥青含量对静态弹性模量的影响

Fig. 3 Influence of cement and emulsified asphalt contents on static elastic modulus

包裹以及空隙填充效果引起的。图4(b)为乳化沥青含量为8%时,不同水泥含量下混合物的拉伸强度比,加入水泥可大大提高混合物的水分敏感性。当水泥含量为0%时,拉伸强度比小于70%,而当水泥含量为3%时,拉伸强度比增加至约85%。

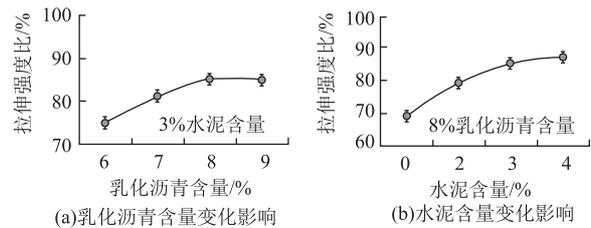


图4 水泥和乳化沥青含量对拉伸强度比的影响

Fig. 4 Influence of cement and emulsified asphalt contents on tensile strength ratio

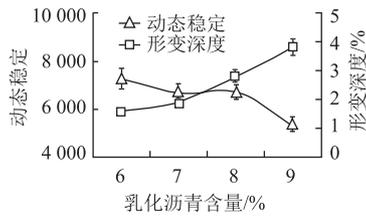
## 3.2 高温稳定性

通过车辙试验,评价水泥和乳化沥青含量对水泥乳化沥青混合料高温稳定性的影响。如图5(a)所示,当水泥含量为3%时,混合物的高温抗车辙性随着乳化沥青含量的增加而降低。具体而言,在乳化沥青含量为9%时,动态稳定性显著低于乳化沥青含量为8%时的动态稳定性。该现象主要是因为乳化沥青用量的增加导致在重复加载和高温的共同作用下,高温车辙阻力出现了明显下降。

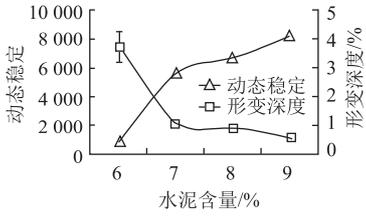
如图5(b)所示,当乳化沥青含量为8%时,混合物的高温抗车辙性在水泥含量增加后表现出更好的性能,从而增加了动态稳定性并减小变形深度。当水泥含量为3%时,动态稳定性达到6715次/mm,因为水泥降低了混合物的温度敏感性,提高了沥青砂浆的高温黏度,从而提高了混合物的高温变形抗力。

## 3.3 低温特性

为了验证混合物在低温下的抗裂性,进行最大弯曲应变和弯曲蠕变刚度(低温性能测量)试验。通常,较大的最大弯曲应变和较小的弯曲蠕变刚度值与较好的低温抗裂性相关。如图6~图8所示为在



(a) 乳化沥青含量变化影响



(b) 水泥含量变化影响

图 5 水泥和乳化沥青含量对耐高温车辙的影响  
Fig. 5 Influence of cement and emulsified asphalt contents on high temperature rutting

-10 ℃下, 乳化沥青含量为 8%, 水泥含量为 3% 的情况下, 混合物的弯曲拉伸强度, 最大弯曲应变和弯曲蠕变刚度。

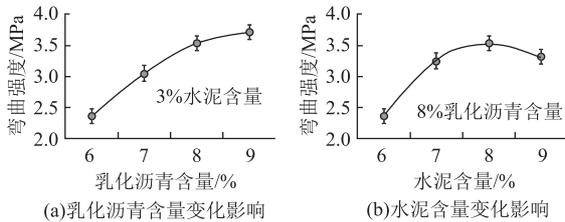


图 6 水泥和乳化沥青含量对弯曲强度的影响  
Fig. 6 Influence of cement and emulsified asphalt contents on bending strength

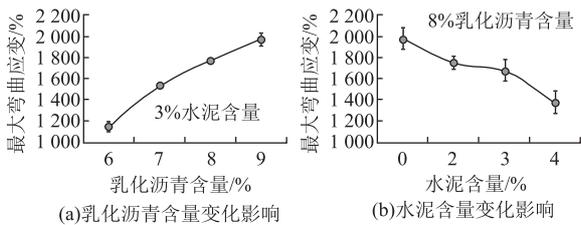


图 7 水泥和乳化沥青含量对最大弯曲应变的影响  
Fig. 7 Influence of cement and emulsified asphalt contents on maximum bending strain

在水泥含量为 3% 时, 乳化沥青含量的增加导致水泥 - 乳化沥青混合物的弯曲拉伸强度和最大弯曲应变的增加。同时, 弯曲蠕变刚度表现出降低, 表明乳化沥青含量的增加可以显著改善混合物的低温抗裂性。

在乳化沥青含量为 8% 时, 当水泥含量从 0% 增加到 4% 时, 混合物的弯曲拉伸强度先增加然后减

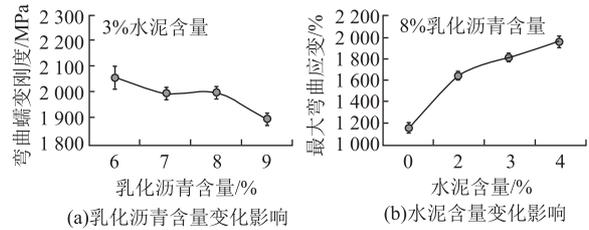


图 8 水泥和乳化沥青含量对弯曲蠕变刚度的影响  
Fig. 8 Influence of cement and emulsified asphalt contents on bending creep stiffness

小。最大弯曲应变减小, 弯曲蠕变刚度增加, 表明随着水泥含量的增加, 混合物的低温抗裂性能下降, 特别是在水泥含量高于 3% 时达到最大值。当水泥含量在 2% 和 3% 之间时, 混合物的弯曲拉伸强度高, 然而当水泥含量增加到 4% 时, 混合物的刚性增加并且最大弯曲应变明显降低。

### 3.4 耐磨性能

如图 9 所示为水泥乳化沥青混合料的 Cantabro 磨耗试验结果。在水泥含量为 3% 时, 乳化沥青含量的增加导致混合物的耐磨性增加 (图 9 (a))。随着乳化沥青含量增加至 8%, 包裹在骨料周围的沥青薄膜变稠, 从而改善了试样的完整性和黏结性, 并使混合物的 Cantabro 损失保持在 20% 以下。在乳化沥青含量为 8% 时, 不同水泥含量下混合物的 Cantabro 损失如图 9 (b) 所示, 随着水泥含量从 0% 增加到 4%, 混合物的 Cantabro 损失先降低然后略有增加。

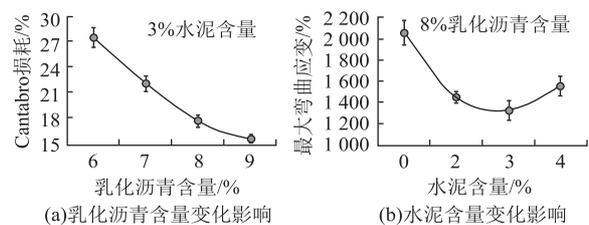


图 9 水泥和乳化沥青含量对耐磨性的影响  
Fig. 9 Influence of cement and emulsified asphalt contents on wear resistance

## 4 扫描电子显微镜 (SEM) 和计算机断层扫描 (CT) 结果

根据每个试样的扫描电子显微镜和 CT 扫描图像, 从材料的细观结构角度进一步分析了水泥和乳化沥青含量对水泥乳化沥青混合料力学性能和路用性能影响。

在乳化沥青中添加水泥后, 沥青砂浆的黏度增加, 可加工性降低, 如图 10 所示分别为普通沥青混合物和水泥乳化沥青混合物 (3% 水泥, 8% 乳化沥

青)的SEM图像。从图像中可以看出,尽管来自沥青破乳的水分为水泥水化提供了必要的水分,但是与普通沥青混合物相比,水泥乳化沥青浆料的表面在硬化后不光滑,并且表现出许多看起来不均匀的突起。另外,浆料内部也形成许多孔,从而导致整体结构松散。

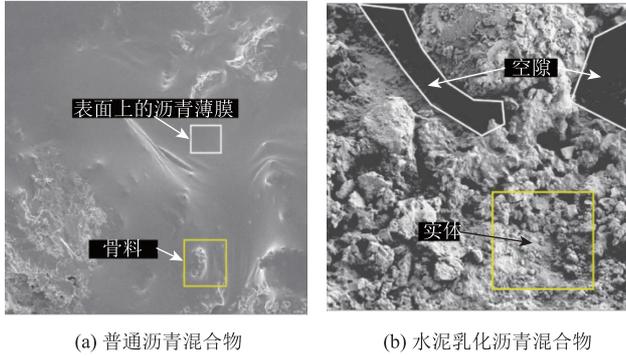


图10 SEM图像(500x)

Fig. 10 SEM images (500x)

如图11、图12所示,以2mm的间隔对试样进行CT扫描,其中空隙显示为白色,混合物显示为黑

色。可以发现当乳化沥青含量为8%和水泥含量为0% (图11(a)), 2% (图11(b))和3% (图11(c))时,混合物的空隙率差异较小,平均值约为4.2%。随着水泥含量增加至4%,混合物的空隙率增加至5.08%,且大孔的数量明显变多,之所以出现这种情况主要是因为水泥含量的增加使得沥青砂浆的黏度增大,从而导致混合物成形后的流动性差。在试验中该混合物表现出较差的可加工性并且难以混合和压实,在最终混合物中留下更多的空隙。因此,水泥乳化沥青混合物中水泥的量不应超过3%。

细观空隙结构的差异也可以解释为什么当水泥含量超过3%时,混合物的间接拉伸强度、压缩强度和弹性模量不会随着水泥含量的增加而增加。一般来说,混合物的机械强度与空隙率密切相关,较大的空隙率导致机械强度降低。另外,水泥含量的增加导致AFt的增加,这部分有效地补偿了抗压强度和弹性模量的降低。当水泥含量为4%时,混合物的空隙结构增加也进一步加剧 Cantabro 损失,同时混合物的疲劳性能也随之降低。

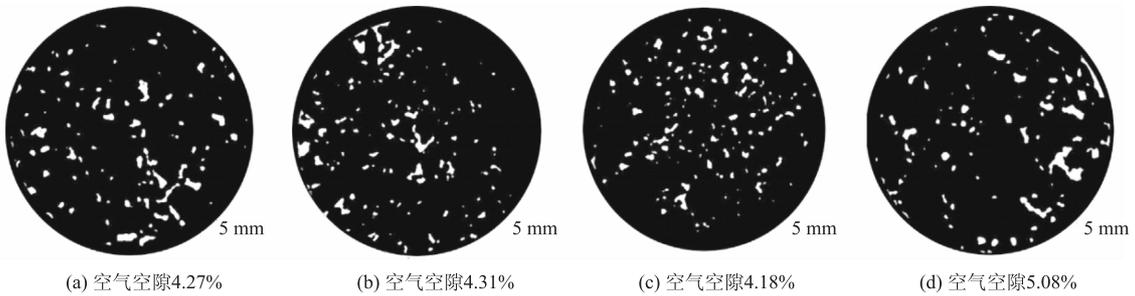


图11 具有不同水泥含量的水泥乳化沥青混合物的CT图像

Fig. 11 CT images of cement emulsified asphalt mixtures with different cement contents

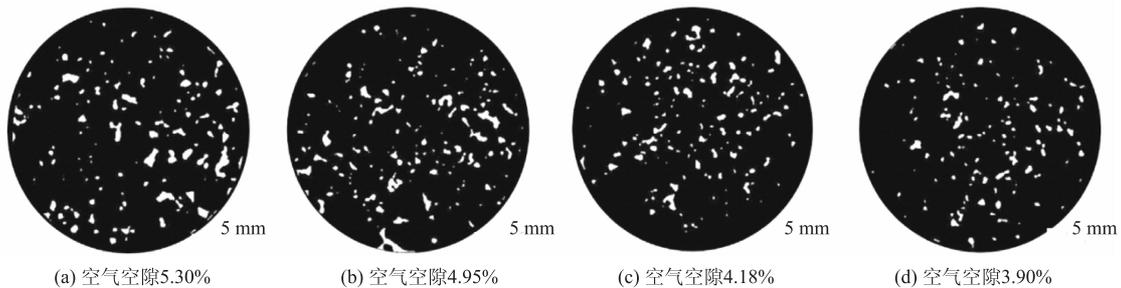


图12 具有不同乳化沥青含量的水泥乳化沥青混合物的CT图像

Fig. 12 CT images of cement emulsified asphalt mixtures with different emulsified asphalt contents

此外,如图13所示当混合物中的水泥含量相对较高时,AFt生长并穿透沥青膜,分离连续沥青膜,因此难以形成整体空间网络。由于沥青填料和不利于水合作用的酸性环境,水泥在混合物中没有充分水合。AFt不能充分形成使用硬化水泥砂浆作为其空间框架的结构,导致水泥乳化沥青混合物没有完整

的网络结构来承受压缩载荷,进而导致抗压强度降低。

通过试验发现,乳化沥青在黏合骨料和填充混合物的空隙中起到重要作用。从图12的CT图像可以看出,随着乳化沥青量的增加,混合物的空隙率逐渐降低。显然与热拌沥青一样,乳化沥青也具有

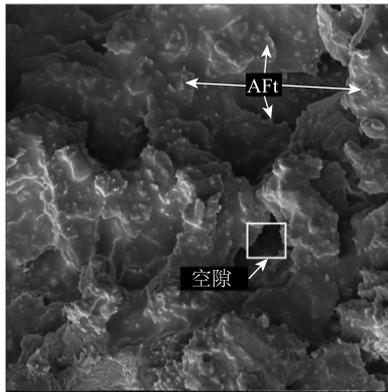


图 13 水泥乳化沥青混合物的水泥水化 (3 000x)

Fig. 13 Cement hydration of cement emulsified asphalt mixture (3 000x)

最佳含量, 当含量太低时乳化沥青的量不足以使水泥黏合、填充和水合, 从而限制混合物强度。当含量超过最佳百分比时, 过量的乳化沥青完全包裹水泥颗粒并限制水泥的水合作用, 导致混合物的机械性能降低。另外, 混合物中空隙的细观结构也影响混合物的路面性能。

## 5 结论

(1) 水泥和乳化沥青含量的变化对水泥乳化沥青混合料的强度特性有着显著的影响。当水泥含量为 3%, 乳化沥青含量从 6% 增加到 9% 时, 间接拉伸强度、压缩强度和弹性模量先增加然后减小。在乳化沥青含量为 8% 时, 水泥含量从 0% 增加到 4% 时, 间接拉伸强度先增加后减小。当水泥含量约为 3% 时, 压缩强度和弹性模量达到最大值。

(2) 水泥的加入有效提高了水泥乳化沥青混合料的高温稳定性和水分敏感性, 但不利于混合料的低温性能。在水泥含量为 2% ~ 3% 时观察到最佳的混合物耐磨性。

(3) 在水泥乳化沥青混合物中, 水泥与沥青破裂后的水分进行反应。AFt 与沥青薄膜交织形成网格结构, 提高了混合物的水分敏感性和高温稳定性。

### 参考文献:

#### References:

- [1] GUO M, TAN Y Q, HOU Y, et al. Improvement of Evaluation Indicator of Interfacial Interaction between Asphalt Binder and Mineral Fillers [J]. Construction and Building Materials, 2017, 151: 236 - 245.
- [2] 王杰, 秦永春, 刘然, 等. 乳化沥青冷再生混合料初期抗磨耗性能评价及技术要求 [J]. 公路交通科技, 2019, 36 (4): 8 - 14.

- WANG Jie, QIN Yong-chun, LIU Ran, et al. Evaluation of Early Anti-abrasion Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture and Technical Requirement [J]. Highway Transportation Science and Technology, 2019, 36 (4): 8 - 14.
- [3] 魏唐中, 洪锦祥, 林俊涛. 水泥与乳化沥青对冷再生强度的影响及作用机理 [J]. 建筑材料学报, 2017, 20 (2): 310 - 315.
- WEI Tang-zhong, HONG Jin-xiang, LIN Jun-tao. Effect and Action Mechanism of Cement and Emulsified Asphalt on the Strength of Cold Regeneration [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20 (2): 310 - 315.
- [4] ORUC S, CELIK F, AKPINAR M V. Effect of Cement on Emulsified Asphalt Mixtures [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2007, 16 (5): 578 - 583.
- [5] KAVUSSI A, MODARRES A. Laboratory Fatigue Models for Recycled Mixes with Bitumen Emulsion and Cement [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24 (10): 1920 - 1927.
- [6] NEJAD F M, HABIBI M, HOSSEINI P, et al. Investigating the Mechanical and Fatigue Properties of Sustainable Cement Emulsified Asphalt Mortar [J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 156: 717 - 728.
- [7] NIAZI Y, JALILI M. Effect of Portland Cement and Lime Additives on Properties of Cold In-place Recycled Mixtures with Asphalt Emulsion [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23 (3): 1338 - 1343.
- [8] 王宏. 不同水泥掺量乳化沥青冷再生混合料细观空隙分布特征 [J]. 公路交通科技, 2016, 33 (7): 27 - 34, 67.
- WANG Hong. Meso-microscopic Void Distribution Characteristics of Emulsified Asphalt Cold Recycled Mixture with Different Cement Contents [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2016, 33 (7): 27 - 34, 67.
- [9] WANG Z J, WANG H F, ZHANG T, et al. Investigation on Absorption Performance between Cement and Emulsified Asphalt with UV-vis Spectrophotometer [J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 256 - 264.
- [10] 黄智勇. 水泥乳化沥青快速修复材料经济效益分析 [J]. 城市道桥与防洪, 2018 (8): 73 - 74.
- HUANG Zhi-yong. Analysis on Economic and Social Benefits of Rapid Repair Material of Cement Emulsified Asphalt [J]. Urban Roads and Bridges and Flood Control, 2018 (8): 73 - 74.
- [11] 杨彦海, 鄢宇航, 杨野. 水泥对乳化沥青冷再生材料性能影响的宏微观分析 [J]. 公路交通科技, 2018, 35 (10): 1 - 8.
- YANG Yan-hai, WU Yu-hang, YANG Ye. Macro and Micro Analysis on Influence of Cement on Performance of Emulsified Asphalt Cold Recycled Material [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (10): 1 - 8.

(下转第 57 页)

- 耦合振动分析 [J]. 振动与冲击, 2008, 27 (1): 29-36.
- FANG Zhi, YIN Xin-feng, PENG Xian. Coupled Vibration Analysis for a Girder Bridge with Random Surface and a Vehicle with Uneven Speed [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27 (1): 29-36.
- [16] 桂水荣, 陈水生, 万水. 基于路面一致激励车桥耦合非平稳随机振动分析 [J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38 (5): 908-915.
- GUI Shui-rong, CHEN Shui-sheng, WAN Shui. Analysis of Consistent Stimulus of Road Roughness on Vehicle-bridge Coupling Nonstationary Random Vibrations [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38 (5): 908-915.
- [17] 张不扬, 张立军, 宗长富. 车辆非平稳行驶随机响应时域分析 [J]. 拖拉机与农用运输车, 2010, 37 (4): 23-24.
- ZHANG Bu-yang, ZHANG Li-jun, ZONG Chang-fu. Analysis for Nonstationary Random Responses of Vehicle in Time Domain [J]. Tractor & Farm Transporter, 2010, 37 (4): 23-24.
- [18] YIN X F, CAI C S, LIU Y, et al. Experimental and Numerical Studies of Nonstationary Random Vibrations for a High-pier Bridge under Vehicular Loads [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18 (10): 1005-1020.
- [19] 张立军, 张天侠. 车辆非匀速行驶时路面随机输入的时频研究 [J]. 汽车工程, 2005, 27 (6): 710-714.
- ZHANG Li-jun, ZHANG Tian-xia. A Study on Road Random Inputs to a Vehicle with Uneven Speed in Time and Frequency Domains [J]. Automotive Engineering, 2005, 27 (6): 710-714.
- [20] 张永林, 钟毅芳. 载重车道路多点随机激励输入的时空相关性建模研究 [J]. 中国公路学报, 2004, 17 (4): 105-108.
- ZHANG Yong-lin, ZHONG Yi-fang. Frequency Domain Model and the Time Domain Model of Bilateral Track Excitation from Road Unevenness [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17 (4): 105-108.
- [21] 张立军, 张天佑. 车辆四轮相关时域随机输入通用模型的研究 [J]. 农业机械学报, 2005, 36 (12): 29-31.
- ZHANG Li-jun, ZHANG Tian-you. Study on General Model of Random Inputs of the Vehicle with Four Wheels Correlated in Time Domain [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (12): 29-31.
- (上接第 21 页)
- [12] 逯艳华, 武泽锋, 朱浮声. 基于桥面铺装下面层水泥-乳化沥青混凝土的水稳定性试验研究 [J]. 混凝土, 2018, 12 (6): 144-147.
- LU Yan-hua, WU Ze-feng, ZHU Fu-sheng. Experimental Study on Water Stability of Cement-emulsified Asphalt Concrete Based on Bridge Deck Pavement [J]. Concrete, 2018, 12 (6): 144-147.
- [13] 李炜光, 梁鹏, 李禅禅, 等. 水泥-乳化沥青-环氧乳液复合材料耐久性及其微观机理研究 [J]. 公路, 2017, 62 (10): 219-224.
- LI Wei-guang, LIANG Peng, LI Chan-chan, et al. Research on the Durability and Microscopic Mechanism of Cement-emulsified Asphalt-epoxy Emulsion Compound Material [J]. Highway, 2017, 62 (10): 219-224.
- [14] 李科成, 杨玉民. 水泥乳化沥青胶浆及混合料性能研究 [J]. 公路工程, 2015, 40 (2): 318-321.
- LI Ke-cheng, YANG Yu-min. Research on the Road Performance of Cement-emulsified-asphalt [J]. Highway Engineering, 2015, 40 (2): 318-321.
- [15] 肖晶晶, 沙爱民, 蒋玮, 等. 基于细观试验的水泥乳化沥青混合料空隙特征 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2013, 41 (9): 1398-1403.
- XIAO Jing-jing, SHA Ai-min, JIANG Wei, et al. Air Void Features of Cement Asphalt Emulsion Mixtures from Microcosmic-test [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2013, 41 (9): 1398-1403.
- [16] 王佃峰. 水泥掺量对乳化沥青混凝土高温性能影响研究 [J]. 山东交通科技, 2018 (3): 110-112.
- WANG Dian-feng. Study on Effect of Cement Content on High Temperature Performance of Emulsified Asphalt Concrete [J]. Shandong Jiaotong Keji, 2018 (3): 110-112.
- [17] 万朝均, 张晓晖, 陶培森. 水泥与阴离子乳化沥青相容性研究 [J]. 混凝土, 2018 (2): 83-85.
- WAN Zhao-jun, ZHANG Xiao-hui, TAO Pei-sen. Investigation on the Compatibility of Cement and Anionic Emulsified Asphalt [J]. Concrete, 2018 (2): 83-85.
- [18] 丁新东, 曹新明. 乳化沥青和水泥掺量对冷再生混合料性能的影响研究 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (2): 459-465.
- DING Xin-dong, CAO Xin-ming. Effect of Emulsified Asphalt and Cement Content on Performance of Cold Recycled Mixture [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39 (2): 459-465.