

# 基于细微观试验的水泥乳化沥青混合料空隙特征

肖晶晶<sup>1</sup>, 沙爱民<sup>2</sup>, 蒋 玮<sup>2</sup>, 王振军<sup>3</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064; 3. 长安大学 材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 水泥乳化沥青混合料中的水泥和乳化沥青会发生相互作用, 因而其空隙结构较普通热拌沥青混合料复杂. 采用 X 射线断层扫描技术(CT)研究乳化沥青用量和水泥用量对混合料中细观空隙分布和空隙特征的影响, 基于扫描电镜(SEM)进一步研究混合料中微观尺度的空隙结构. 结果表明, 随着乳化沥青用量的增大, 混合料内部空隙尺寸有所减小, 试件水平断面上的空隙总面积和平均单个空隙面积减小; 水泥用量超过 3% 时, 混合料的 CT 可视空隙率明显增大, 且空隙中的大尺寸空隙比例增高; 由于乳化沥青及水泥材料的相互作用, 水泥乳化沥青混合料的内部空隙结构比传统热拌沥青混合料疏松.

**关键词:** 道路工程; 水泥乳化沥青; 空隙; 微观结构

**中图分类号:** U414.1

**文献标志码:** A

## Air Void Features of Cement Asphalt Emulsion Mixtures from Microcosmic-test

XIAO Jingjing<sup>1</sup>, SHA Aimin<sup>2</sup>, JIANG Wei<sup>2</sup>, WANG Zhenjun<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** Cement and emulsified asphalt within the cement asphalt emulsion mixture experienced interactions, which created more complex air void microstructure in comparison with normal hot mix asphalt. The influence on air void distribution and air void features from emulsion and cement content were studied by computed tomography, air void structure of micro-scale were further researched by scanning electron microscope. The results of the study show that the air void size, total air void area and average single air void area of cement asphalt emulsion mixture specimens section

decrease with the increase of emulsion content; CT visible air void of mixtures and the ratio of big air void increase observably when the cement content is over 3%. Internal air void structure of cement asphalt emulsion mixtures tends to be looser than traditional hot mix asphalt for the interaction of cement and emulsion asphalt.

**Key words:** road engineering; cement asphalt emulsion mixtures; air void; microstructure

水泥乳化沥青混合料综合了热力学上互不相容的有机结合料乳化沥青和无机结合料水泥的胶结特性<sup>[1-2]</sup>, 与石料进行拌和后, 乳化沥青聚并破乳形成粘结力, 水泥水化结晶固化并放热, 水泥水化产物与沥青膜交织缠绕, 复合形成一种新的路面材料<sup>[3-5]</sup>. 由于其能够实现冷拌冷铺, 极大地减少了施工过程中的能耗和碳排放, 因而在路面工程中得到了越来越多的应用.

在路面混合料配合比设计和施工质量控制中, 空隙率是关键指标, 它与路面的使用状况及寿命有着密切的关系<sup>[6-9]</sup>. 当沥青混合料空隙率大于 8% 时, 路面存在早期疲劳裂缝、刚度降低、老化和剥落等问题, 当空隙率增至 9%~11% 时, 老化将会加速. 水泥乳化沥青混合料这种新型路面材料中含有无机物的水泥和有机的乳化沥青, 在一定条件下可以产生相互作用<sup>[10-11]</sup>, 导致相同集料级配条件下混合料空隙特征与普通沥青混凝土的差别较大, 国内外现有资料表明水泥乳化沥青混合料空隙率一般在 5%~12% 之间<sup>[12]</sup>, 通过调整矿料级配, 或者改变水泥和乳化沥青的添加量, 均难以使其空隙率降低到 4% 以下. 为此, 论文基于 CT 及 SEM 等细微观试验手段对水泥乳化沥青混合料的细观空隙特征进行研究.

收稿日期: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51208049); 中国博士后科学基金(2012M511966); 国家“九七三”重点基础研究发展计划前期研究专项(2012CB626814); 中央高校基本科研业务费专项资金(CHD2011JC158)

第一作者: 肖晶晶(1982—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为路面材料与结构. E-mail: xiaojj029@sina.com

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

乳化沥青为试验室自行制备,各主要技术指标如表 1 所示.水泥为 32.5R 普通硅酸盐水泥,各项技术指标符合规范要求.

表 1 乳化沥青的主要技术指标

Tab.1 Main technical indexes of cement asphalt emulsion mixtures

检测项目	实测结果	规范要求
筛上残留物质量分数/%	0.01	≤0.1
残留物质量分数/%	64.1	≥55
残留物延度(15℃)/cm	72.5	≥40
常温贮存稳定性(5 d)/%	2.9	≤5

集料采用玄武岩,技术指标符合《公路工程集料试验规程》JTGE42 的技术要求.混合料矿料级配如

表 2 试验所用矿料级配

Tab.2 Gradation of mixtures for testing

通过下列筛孔尺寸(mm)的质量分数/%									
16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
100.0	95.1	80.4	55.5	34.4	21.8	17.4	12.5	10.1	6.7

2 乳化沥青用量对混合料空隙特征的影响

固定水泥用量(质量分数)为 3%,获取乳化沥

表 2 所示.

1.2 试验方案

成型不同水泥和沥青用量的马歇尔试件,采用 CT 无损检测技术获取混合料的断面空隙信息. CT 扫描设备为 PICKER 公司 PQ5000 CT,扫描角度为 360°.测试时沿试件高度方向每隔 2 mm 进行扫描,获取的断面图片像素为 512×512,如图 1a 所示,对图片进行阈值处理,得出图 1b 所示空隙分布情况(黑色部分代表空隙),采用 ImageJ 软件对图像进行处理,如图 1c 所示.获取断面空隙面积和单个空隙特征数据,根据图像像素和试件面积,计算空隙率,分析空隙细观特征,研究乳化沥青和水泥用量对混合料细观空隙特征的影响规律.

采用 Philips-FEI Quanta200 扫描电镜,研究水泥乳化沥青混合料微观尺度的空隙特点.

青用量(质量分数)分别为 6%,7%,8%和 9%的马歇尔试件 CT 图像,按照状态法进行阈值处理后得到混合料的断面空隙图像(图 2).

采用 ImageJ 对不同乳化沥青用量试件的断面图像空隙特征指标进行统计和汇总,得到断面平均

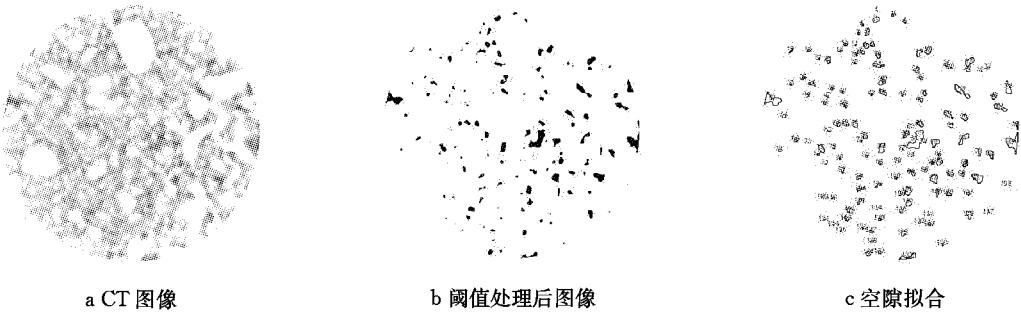


图 1 CT 图像和处理  
Fig.1 CT images and treatment

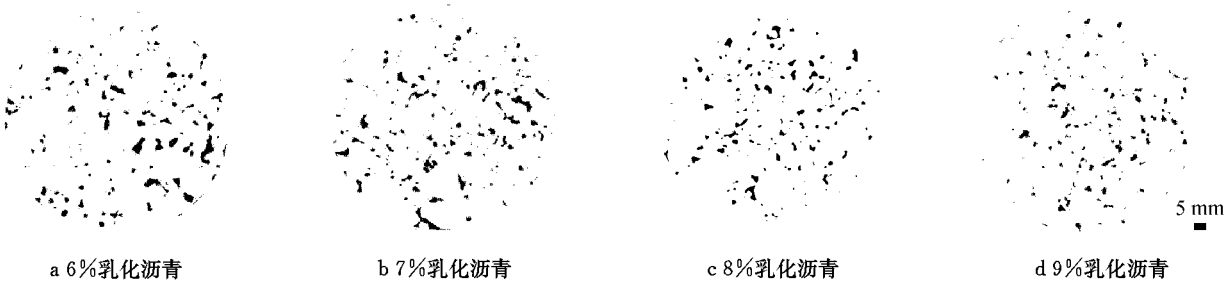


图 2 不同乳化沥青用量的混合料断面空隙图像  
Fig.2 Representative images of specimens section with different emulsion asphalt contents

空隙数量、平均单个空隙面积、空隙等效直径和 CT 可视空隙率等空隙特征值,如表 3 所示. 其中空隙的等效直径是将空隙形状等效为圆形时对应得到的圆直径,是反映单个空隙大小的指标;CT 可视空隙率定义为 CT 断面图像中空隙总面积与断面图像总面积的比值,即通过 CT 图像获取的试件空隙率.

表 3 不同乳化沥青用量时试件断面上的空隙特征

Tab.3 Air void features of specimens section with different emulsion asphalt contents

乳化沥青用量/ %	断面平均空隙 数量/个	空隙总 面积/ mm <sup>2</sup>	平均单个 空隙面积/ mm <sup>2</sup>	空隙等 效直径/ mm	CT 可视 空隙率/ %
6	133	426.90	3.21	2.02	5.30
7	126	385.26	3.06	1.97	4.95
8	132	330.42	2.50	1.79	4.18
9	134	307.82	2.30	1.71	3.90

## 2.1 空隙尺寸

由表 3 可知,随着乳化沥青用量的增大,混合料内部空隙尺寸有所减小,表现为 CT 断面图像上的空隙总面积和平均单个空隙面积的减小,如图 3 所示.

水泥乳化沥青混合料内部空隙尺寸减小的原因可以解释如下:一方面,在相同水泥用量下,随着乳液用量的增多,混合料的拌和和易性得到改善,集料表面被更多的乳液包裹,集料之间更加润滑,混合料的压实性能变好,集料与集料之间有更多的沥青胶浆填充,空隙率和单个空隙尺寸有所降低. 另一方面,水泥水化 Zeta 电位为负值,加入到乳化沥青中与阳离子乳化沥青会产生电荷吸附;同时水泥颗粒有强烈的亲水性,会将乳化沥青中的水相吸附于其表面,作为水泥水化所需的反应用水,生成牢固的化

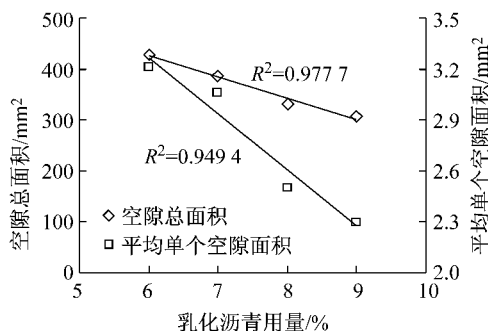


图 3 乳化沥青用量对试件断面空隙总面积和平均单个空隙面积的影响

Fig.3 Emulsion asphalt content influence on pore area and average single air void area of specimens section

学结合水,降低混凝土水分蒸发. 较多的乳化沥青也提供了更多的水分以供水泥发生水化反应,水泥发生水化反应后体积膨胀,也会大大减小混合料内部的孔体积,这也是导致空隙率和空隙尺寸发生变化的原因.

## 2.2 空隙数量

当乳化沥青用量由 6% 增大至 9% 时,CT 断面图像上的平均空隙数量没有显著的变化规律,空隙数量范围为 120~138 个. 不同尺寸空隙数量的统计结果表明乳化沥青用量的增大能够显著降低混合料中较大空隙的数量,如图 4 所示. 当乳化沥青用量为 6% 时,CT 图像断面中面积大于 10 mm<sup>2</sup> 的空隙个数占空隙总数的 8.3%,而当乳化沥青用量增大到 9% 时,这一比例降低至 2.2%;与此同时,CT 图像断面中面积小于 1 mm<sup>2</sup> 的空隙个数占空隙总数的百分比相应的由 33.8% 增至 44.8%.

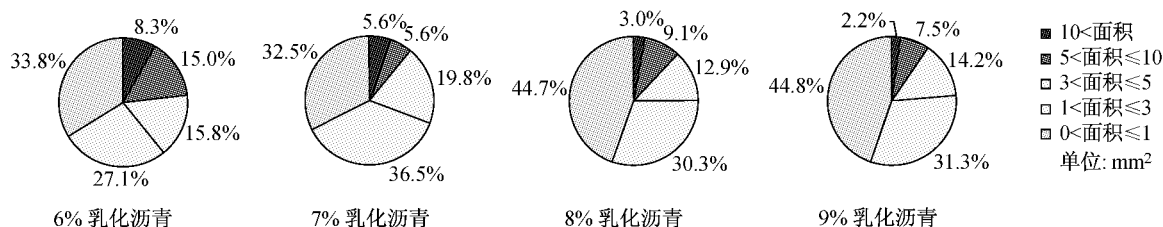


图 4 乳化沥青用量对试件断面不同尺寸空隙数量分布的影响

Fig.4 Emulsion asphalt content influence on air void number with different area of specimens section

试验结果表明,乳化沥青用量的变化不会造成混合料中空隙数量的变化,但适当地增大乳化沥青用量至 8%~9% 时,可以优化混合料中空隙尺寸的分布结构,显著减小较大空隙(面积大于 10mm<sup>2</sup>)的

数量,使空隙分布趋于细致及均匀.

## 2.3 CT 可视空隙率

随着乳化沥青用量的增大,试件的 CT 可视空隙率呈下降趋势,如图 5 所示. 较大的乳化沥青用量

使得集料表面包裹的沥青膜增厚,集料与集料之间的摩擦力大大降低,混凝土易于拌和,易于击实,混凝土空隙率降低。

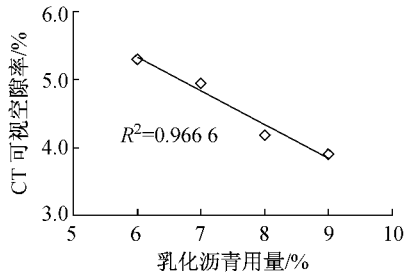


图5 乳化沥青用量对混合料CT可视空隙率的影响

Fig.5 Emulsion asphalt content influence on CT visible air void of mixtures

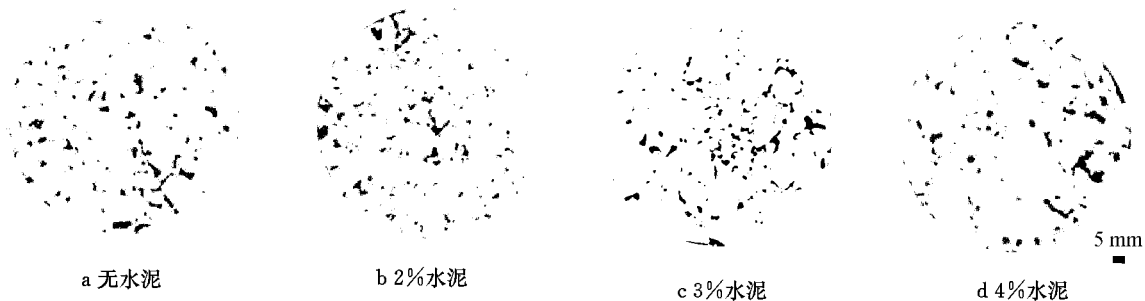


图6 不同水泥用量的混合料断面空隙代表图像

Fig.2 Representative images of specimens section with different cement content

表4 不同水泥用量时试件断面上的空隙特征指标

Tab.4 Air void features of specimens section with different cement content

水泥用量/%	断面平均空隙数量/个	空隙总面积/mm <sup>2</sup>	平均单个空隙面积/mm <sup>2</sup>	空隙等效直径/mm	CT 可视空隙率/%
0	143	346.11	2.42	1.76	4.27
2	128	349.64	2.73	1.86	4.31
3	132	330.42	2.50	1.79	4.18
4	109	411.47	3.77	2.19	5.08

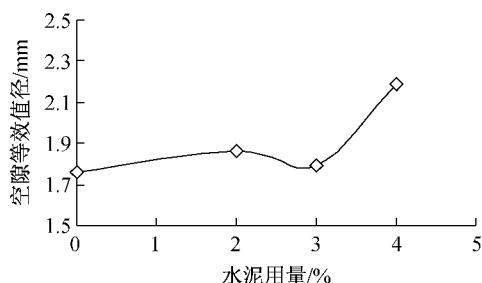


图7 水泥用量对试件断面图像空隙等效直径的影响

Fig.7 Cement content influence on air void equivalent diameter of specimens section

当水泥用量增大到一定程度后,与乳化沥青聚集并裹附成团,且水泥的比表面积很大,消耗掉大量

### 3 水泥用量对混合料空隙特征的影响

固定乳化沥青用量为8%,获取水泥用量分别为0,2%,3%和4%的马歇尔试件CT图像,阈值处理后如图6所示.计算统计断面图像空隙特征指标,如表4所示。

#### 3.1 空隙尺寸

空隙等效直径指标反映了试件中空隙的尺寸,由图7可以看出,当水泥用量不超过3%时,对混合料中的单个空隙尺寸没有显著影响,约为1.8 mm;而当水泥用量增大至4%时,混合料中的空隙等效直径显著增大,约为2.2 mm。

的乳化沥青,使得集料表面的有效沥青含量变少,集料与集料之间的摩擦力大,混合料压实性能较差;同时,水泥用量高,水泥乳化沥青胶浆的粘度大,流动性差,混合料成型后胶浆难以流动自动分配,留下较大尺寸空隙.因此,乳化沥青混合料中的水泥用量一般不宜超过3%。

#### 3.2 空隙数量

由表2中统计数据可以得出,当不掺加水泥时,混合料空隙数量最多,以小尺寸孔隙为主.这是由于当乳化沥青用量为8%,不掺水泥时,混合料的拌和和易性及压实性都较好.CT扫描下存在于混合料内部的可视空隙主要是集料与集料之间的间隙,混合料拌和过程中引入的较大的气泡爆破后留下的空隙,以及乳液中水分蒸发留下的空隙;同时乳化沥青相对含量较高,稀浆流淌性好,混合料内部大的空隙在乳液完全破乳之前得到一定程度的填充,因而试件中以小尺寸空隙为主,只在上下两个断面有少数几个大尺寸空隙。

当水泥用量为4%时,混合料中空隙数量较少,但单个空隙面积较大,这主要是因为水泥用量比较多,水泥吸附大量乳化沥青,使集料表面裹附的沥青

相应减少,集料与集料之间的摩擦力变大,混合料不易压实,留下许多空隙.水泥遇水会发生水化反应,但是水泥乳化沥青混合料中的环境比较复杂,只有少量的水泥能够发生水化反应.所以在混合料中,并没有因为水泥用量加大,水泥的水化反应程度就有所提高,水化产物就有所增加,混合料就更加密实,相反地,过多的水泥只是一种惰性的填料,消耗了大量的乳液,使得混合料的拌和和易性和压实性都有所降低,从而导致试件在 CT 图像中出现较多个可视的大尺寸空隙.

### 3.3 CT 可视空隙率

图 8 所示为试件的 CT 可视空隙率同混合料中水泥用量的关系.可以看出,水泥用量由 0 增大至 3% 的过程中,混合料的 CT 可视空隙率没有明显变化,而当水泥用量增至 4% 时,混合料的 CT 可视空隙率显著增大.同样证明了水泥用量过大不利于混合料的拌和和易性和压实性能,试件的 CT 可视空隙率增大.乳化沥青和水泥石内部存在的微孔隙体积的存在,导致不同水泥用量下的混合料 CT 可视空隙率值亦明显小于表干法试验得到的空隙率值.

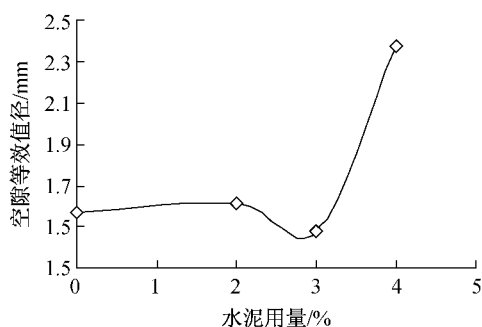


图 8 水泥用量与混合料 CT 可视空隙率的关系

Fig.8 Cement content influence on CT visible air void of mixtures

## 4 混合料微观空隙结构

水泥乳化沥青混合料中含有无机物的水泥和有机物的乳化沥青,在一定条件下可以产生相互作用,因而混合料的空隙不仅包括集料内部的孔隙、集料与集料之间的间隙,还包括水泥乳化沥青复合胶浆硬化后内部存在的孔隙,这些孔隙包括混合料成型过程中引入空气形成气泡、气泡破裂后留下的“空位”、乳化沥青破乳、水分蒸发后留下的孔隙,以及水

泥水化产物中存在的球形大孔、毛细孔和凝胶孔.而泥石内部存在的这些孔隙体积都非常小,在 CT 扫描下肉眼几乎不可视,并且数量巨大,难以统计.因此采用 PHILIPS-FEI Quanta 200 扫描电镜进一步对水泥乳化沥青胶浆的微观特征进行研究,并与普通沥青胶浆进行对比.

与图 9 所示的基质沥青胶浆相比,乳化沥青破乳产生的水分虽然能够提供水泥水化所需水分,但也会使自身浆体结构变得疏松,空隙增大.如图 10 所示,硬化成型后的水泥乳化沥青浆体表面不光滑,存在许多突起,显得凹凸不平,浆体内部存在许多孔隙,整体结构较为疏松.

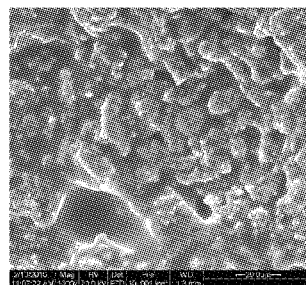


图 9 沥青胶浆 SEM 图像(1 000×)

Fig.9 SEM image of hot asphalt mortar(1 000×)

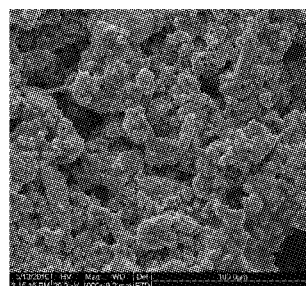


图 10 水泥乳化沥青胶浆 SEM 图像(1 000×)

Fig.10 SEM image of cement emulsified asphalt mortar(1 000×)

## 5 混合料性能

对不同水泥和乳化沥青用量的水泥乳化沥青混合料进行路用性能试验,结果如表 5 所示,不同的水泥和乳化沥青用量下混合料的性能差异显著.总体上来看,乳化沥青用量为 8%,水泥用量为 3% 时,此时混合料的高温、低温、水稳和力学性能均表现良好.这与前面空隙特征分析的结果是一致的.

表5 不同水泥和乳化沥青用量的混合料性能

Tab.5 Mixture performance with different cement &amp; emulsified asphalt content

乳化沥青用量 /%	6	7	8	8	8	8	9
水泥用量 /%	3	3	0	2	3	4	3
冻融劈裂 /%	75	81	69	79	85	87	85
劈裂强度 /MPa	0.71	0.87	0.67	0.82	0.92	0.72	0.83
抗剪强度 /MPa	3.73	3.92	3.15	3.91	4.33	4.31	4.10
模量 /MPa	956	1 081	705	961	1 123	1 137	1 036
车辙动稳定度/(mm·次 <sup>-1</sup> )	7 261	6 656	862	5 637	6 715	8 262	5 339
变形深度 /mm	1.6	1.9	11.2	3.3	2.8	1.8	3.8
抗弯拉强度(-10℃)/MPa	2.36	3.05	2.39	2.95	3.53	3.19	3.71

## 6 结论

(1)随着乳化沥青用量的增大,混合料内部空隙尺寸有所减小,水平断面上的空隙总面积和平均单个空隙面积减小;乳化沥青用量的变化不会造成混合料中的空隙数量的变化,但适当地增大乳化沥青用量至8%~9%时,可以优化混合料中空隙尺寸的分布结构,使空隙分布趋于细致及均匀。

(2)乳化沥青混合料中,水泥用量超过3%时,混合料的CT可视空隙率明显增大,且空隙中的大尺寸空隙比例增高,其原因是因为水泥用量过大消耗了大量的乳液,使得混合料的拌和和易性和压实性都有所降低,试件内部出现较多的因压实不足形成的集料与集料的间隙。

(3)由于乳化沥青及水泥材料的特殊性,水泥乳化沥青混合料的内部结构比传统热拌沥青混合料疏松。混合料成型过程中引入空气形成气泡,气泡破裂后留下的“空位”、乳化沥青破乳、水分蒸发后留下的空隙、水泥水化产物中存在的各种尺寸孔隙以及压实后存在的集料与集料之间的间隙共同构成了水泥乳化沥青混合料复杂的空隙结构。

(4)水泥乳化混合料断面的细观空隙特征随水泥和乳化沥青用量的变化规律同混合料的性能具有一定的联系,乳化沥青用量为8%,水泥用量为3%时,水泥乳化沥青混合料的高温、低温、水稳和力学性能均表现良好。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Amir K, Amir M. Laboratory fatigue models for recycled mixes with bitumen emulsion and cement[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(10): 1920.
- [3] 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.
- [4] 沙爱民, 王振军. 水泥乳化沥青混凝土胶浆-集料界面微观结构[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 1.  
SHA Aimin, WANG Zhenjun. Microstructure of mastics-aggregate interface in cement emulsified asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University, Natural Science Edition, 2008, 28(4): 1.
- [5] 杜少文, 王振军. 水泥改性乳化沥青混凝土力学性能及微观机理[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 1040.  
DU Shaowen, WANG Zhenjun. Mechanical properties and microcosmic mechanism of cement modified asphalt emulsion concrete[J]. Journal of Tongji University, Natural Science, 2009, 37(8): 1040.
- [6] Dubois V, Roche C D L, Burbano O. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 885.
- [7] Wimpy S. Determination of critical asphalt pavement voids through laboratory aging [D]. Storrs: Civil Engineering of University of Connecticut, 1992.
- [8] Prithvi S K, Sanjoy C. Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures (NCAT report No. 96-4) [R]. Auburn: National Center for Asphalt Technology of Auburn University, 1996.
- [9] The Asphalt Institute. Mix design methods for asphalt concrete and other hot-mix types (MS-2) [M]. Lanham: National Asphalt Pavement Association of America, 1997.
- [10] Lu Chengtsung, Kuo Mingfeng, Shen Der-hsien. Composition and reaction mechanism of cement- asphalt mastic [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(7): 2580.
- [11] Dubois V, Roche C D L, Burbano O. Influence of the compaction process on the air void homogeneity of asphalt mixtures samples [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6): 885.
- [12] 王振军. 水泥乳化沥青混凝土浆体-集料界面区结构与性能研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2007.  
WANG Zhenjun. Study on structure and performance of mortar-aggregate interface zone in cement emulsified asphalt concrete [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.