

# 基于 X-ray CT 的沥青混合料空隙测试精度影响因素分析

谭忆秋<sup>1</sup>, 任俊达<sup>1,2</sup>, 纪 伦<sup>1</sup>, 许振宇<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨; 2. 辽宁省交通科学研究院, 110015 沈阳)

**摘 要:** 为了分析细观尺度下沥青混合料空隙率测试精度的影响因素,采用德国 Phoenix v|tome|x S240 型工业 X-ray CT 机,结合正交试验设计与方差分析,研究不同 CT 参数及级配类型对沥青混合料三维重构体积参数的影响.通过对不同级配类型马歇尔试件扫描并进行三维重构与体积分析,建立影响因素与空隙率测试结果之间的关系,进而确定最优扫描参数.试验结果表明,基于细观尺度对沥青混合料进行三维体积分析是可行的;扫描电压、电流及级配类型对重构结果有不同程度的影响;适当提高电压、电流及选择恰当的滤波片可提高测试结果的准确性;在恰当的设备参数条件下,基于细观尺度与宏观尺度下得到的沥青混合料空隙率具有良好的相关性,有助于提高测试结果的准确性与试验的经济性.

**关键词:** 细观结构;X-ray CT;沥青混合料;三维重构;测试精度

**中图分类号:** U414. 75      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2014)06-0065-07

## Analysis of influencing factors of the test precision of asphalt mixture voids based on X-ray CT

TAN Yiqiu<sup>1</sup>, REN Junda<sup>1,2</sup>, JI Lun<sup>1</sup>, XU Zhenyu<sup>1</sup>

(1. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China;

2. The Communication Research Institute of Liaoning Province, 110015 Shenyang, China)

**Abstract:** To study the factors that influence the test precision of percent air voids of asphalt mixture based on mesoscopic scale, German Phoenix v|tome|x S240 industrial X-ray CT was utilized in combination with orthogonal test and variance analysis to study how different CT parameters and gradation types influenced the 3D reconstruction volume parameters of asphalt mixture. Marshall specimens were scanned by changing the parameters of CT and gradation types of asphalt mixture and the results were used for three-dimensional analysis, the relation between influence factors and percent air voids was also built, and then determine the optimal scanning parameters. The test results showed that it is feasible to make three-dimensional volume analysis of asphalt mixture on the basis of meso-scale; the scanning parameters and gradation types have different levels of effects on reconstruction results; the test accuracy would be improved by increasing scanning voltage and current properly and as well as choosing the appropriate filters. The percent air voids that obtained on the base of both meso-scale and macro-scale had good correlation under the condition of appropriate parameter of apparatus, in addition can improve the accuracy and economy of the test.

**Keywords:** meso-structure; X-ray CT; asphalt mixture; three-dimensional reconstruction; test precision

沥青混合料是由沥青、矿粉、石料、空隙等多种具有不同力学性质、不同几何形状材质组成的具有多相结构的非各向同性材料<sup>[1]</sup>.其中细观结

构下空隙三维分布特征是影响沥青混合料车辙、水损害等病害的关键因素,是沥青混合料研究的最热点问题之一.国内外学者通过 CT 扫描及图像处理技术对空隙率的研究取得了很大的发展, Masad 等<sup>[2-3]</sup>对旋转压实(SGC)成型试件的内部空隙进行分析,研究表明 SGC 成型试件空隙分布沿高度方向呈“两头大,中间小”趋势.Wang L.B.

收稿日期: 2013-03-18.

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(51225803).

作者简介: 谭忆秋(1968—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 纪 伦, jilun@hit.edu.cn.

等<sup>[4]</sup>提出了确定试件局部空隙率和空间梯度的方法,发现 3 种 Westrack 混合料的空隙率、空间梯度和混合料性能密切相关.Arambula 等<sup>[5]</sup>采用 CT 对两种不同级配和用 SGC 两种不同的压实角度成型的试件进行研究,评价了沥青混合料空隙率空间分布与水稳定性的关系.Al-Omari 等<sup>[6]</sup>研究了沥青混合料的渗透性与空隙的三维分布之间的关系.Tashman 等<sup>[7]</sup>开展了沥青混合料的裂缝分布及微观结构的三维重构和演化仿真.吴文亮等<sup>[8-9]</sup>采用双峰法对沥青混合料中组成成分进行识别,并结合断层扫描图片对空隙的三维及平面分布特性分别进行了分析.基于细观尺度下的沥青混合料空隙率的研究逐渐成为解决当前沥青路面复杂行为的切入点和着力点.

传统的空隙率和矿料间隙率等体积参数都是由沥青混合料试件的相对密度和最大相对密度计算得到的二次指标,其大小直接由试件相对密度和最大相对密度决定.而确定混合料理论密度的方法主要有两种:一是通过真空法直接测定混合料的密度;二是通过沥青、石料等的密度按计算公式计算得到,即所谓的计算方法<sup>[10]</sup>.虽然计算方法可以较准确地得出沥青混合料的空隙值,但是这都忽略了沥青混合料细观结构下空隙的复杂三维分布,难以揭示沥青混合料的变形和破坏机制.

因此,本文利用工业 X-ray CT,结合数字图像处理技术,探究工业 X-ray CT 参数配置及混合料级配类型对空隙率测试精度的影响;采用正交试验设计方法,通过改变 X-ray CT 的扫描参数配

置及沥青混合料的级配类型,对标准成型的马歇尔试件进行 X 射线扫描并三维体积重构;利用 VGStudio MAX 2.2 软件对沥青混合料体积参数进行分析;并对试验结果进行极差分析、方差因素分析,建立影响因素与空隙率之间的关系,以此判断影响沥青混合料重构准确性的因素,进而优化扫描试验参数配置,确定最佳仪器参数,为后续沥青混合料细观结构研究奠定基础.

## 1 实 验

### 1.1 试验设备

试验设备为德国菲尼克斯公司(Phoenix | X-ray)Phoenix v|tome|x S240 型工业 CT 机,机器参数配置为:最大管电压 240 kV;最大管功率 320 W;细节分辨能力 1 μm;最大像素分辨率<2 μm(3D).试验中,沿试件高度每 0.1 mm 取一张图像,每个试件共扫描 1 500 张图像.

### 1.2 试验材料

本文采用的集料取自哈尔滨市阿城碎石场,矿粉采用吉林梨树某地矿粉,集料性质见表 1;沥青采用盘锦辽河油田 90# 基质沥青,其性质为:针入度 (100 g, 5 s, 25 ℃,) 8.63 mm;延度 (5 cm/min, 5 ℃) 23.1 cm;软化点 45.8 ℃.试验选用混合料类型分别为:AC-13、AC-16、AC-20,级配采用文献 15 中推荐的级配范围中值(如表 2 所示);每种级配油量分别为 4.8%、4.6%、4.4%;马歇尔试件拌和温度为 150 ℃,击实温度为 150 ℃,双面击实 75 次成型.

表 1 集料性能检测结果

| 集料粒径/mm | 表观相对密度 | 吸水率/% | 针片状/% | 压碎值/% | 磨耗值/% |
|---------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 26.50   | 2.76   | 0.35  | 8.1   | 12.7  | 15.3  |
| 19.00   | 2.79   | 0.33  | 10.1  | 12.7  | 15.3  |
| 16.00   | 2.83   | 0.37  | 12.0  | 12.7  | 15.3  |
| 13.20   | 2.82   | 0.36  | 11.5  | 12.7  | 15.3  |
| 9.50    | 2.84   | 0.39  | 10.7  | 12.7  | 15.3  |
| 4.75    | 2.81   | 0.68  | 13.9  | 12.7  | 15.3  |

表 2 沥青混合料矿料级配组成

| 级配类型  | 通过以下不同筛孔(方孔筛,mm)的质量分数/% |     |     |      |      |      |      |      |      |      |      |       |
|-------|-------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
|       | 26.5                    | 19  | 16  | 13.2 | 9.5  | 4.75 | 2.36 | 1.18 | 0.6  | 0.3  | 0.15 | 0.075 |
| AC-13 | 100                     | 100 | 100 | 95   | 76.5 | 53   | 37   | 26.5 | 19.0 | 13.5 | 10.0 | 6     |
| AC-16 | 100                     | 100 | 95  | 84   | 70.0 | 48   | 34   | 24.5 | 18.5 | 12.5 | 9.5  | 6     |
| AC-20 | 100                     | 95  | 85  | 71   | 61.0 | 41   | 30   | 22.5 | 16.0 | 11.0 | 8.5  | 5     |

依照文献[11]成型制作标准马歇尔试件,每组级配设置 3 个平行件,经计算得到 3 种不同级配

试件的空隙率分别为  $VV_{13} = 4.4\%$ ,  $VV_{16} = 4.5\%$ ,  $VV_{20} = 4.7\%$ .

2 X-ray扫描体积组成识别与试验数据分析

2.1 试验方案

为探究 X-ray CT 机参数配置及混合料级配类型对空隙率测试精度的影响, 本文采取正交试验设计<sup>[12]</sup>. 试验采用三因素三水平(见表 3), 3 个

试验因素分别为: 电压/电流大小; 混合料级配类型; 滤波片种类, 分析指标为空隙率. 试验中分别按表 4 所示的正交设计, 在规定的试验条件下, 对马歇尔试件进行 X 射线扫描, 其中, 表 4 中 A、B、C 分别代表试验因素电压/电流值、滤波片种类、级配类型.

表 3 试验因素水平表

| 水平 | $U/\text{kV}$ | $I/\mu\text{A}$ | 级配类型  | 滤波片     |
|----|---------------|-----------------|-------|---------|
| 1  | 140           | 40              | AC-13 | 两片铜     |
| 2  | 160           | 60              | AC-16 | 一片锡     |
| 3  | 180           | 80              | AC-20 | 一片锡、一片铜 |

表 4 正交试验设计及结果

| 试验编号  | A     | B     | C     | 空列    | 空隙率/% |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1#    | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 5.73  |
| 2#    | 1.00  | 2.00  | 2.00  | 2.00  | 14.20 |
| 3#    | 1.00  | 3.00  | 3.00  | 3.00  | 13.10 |
| 4#    | 2.00  | 1.00  | 2.00  | 3.00  | 5.69  |
| 5#    | 2.00  | 2.00  | 3.00  | 1.00  | 6.37  |
| 6#    | 2.00  | 3.00  | 1.00  | 2.00  | 5.78  |
| 7#    | 3.00  | 1.00  | 3.00  | 2.00  | 5.25  |
| 8#    | 3.00  | 2.00  | 1.00  | 3.00  | 4.42  |
| 9#    | 3.00  | 3.00  | 2.00  | 1.00  | 6.34  |
| $K_1$ | 33.03 | 16.67 | 15.93 | 18.44 |       |
| $K_2$ | 17.84 | 24.99 | 26.23 | 25.23 |       |
| $K_3$ | 16.01 | 25.22 | 24.72 | 23.21 |       |
| $k_1$ | 11.01 | 5.56  | 5.31  | 6.15  |       |
| $k_2$ | 5.95  | 8.33  | 8.74  | 8.41  |       |
| $k_3$ | 5.34  | 8.41  | 8.24  | 7.74  |       |

2.2 三维图像重构及处理

扫描结束后, 利用 `datos|x reconstruction` 对扫描后的二维图像进行三维重构, 得到马歇尔试件的三维数字图像如图 1 所示, 该图像由集料颗粒、沥青胶浆、空隙以及扫描形成的空间背景等 4 种差异性物质组成, 根据密度差异性对沥青混合料中集料、沥青胶浆、空隙进行区分. 图 2 为马歇尔试件的三维空隙分布情况.

扫描后的图像的灰度直方图如图 3 所示. 由左向右逐渐增大并呈三峰分布. 背景和空隙是左边的峰, 分布相对集中且容易区分, 沥青胶浆与集料的灰度分布呈现两峰一谷形式<sup>[13]</sup>. 采用双峰法<sup>[14]</sup>, 确定区分空隙与沥青胶浆的阈值  $T_1$  及区分沥青胶浆和集料的阈值  $T_2$ , 由于集料和沥青胶浆的密度差别较小, 导致沥青胶浆和粗集料的峰值边界不是很明显, 初步确定胶浆和集料的阈值

后, 采用反复试验调整分割阈值, 得到三值化图如图 4 所示. 以两类间方差大小自适应确定阈值<sup>[15]</sup>, 利用 VGStudio MAX 2.2 软件分别识别出马歇尔试件内部的集料、沥青胶浆、空隙的体积大小, 分别计算每组正交试验下的马歇尔试件的空隙率, 结果计入表 4.

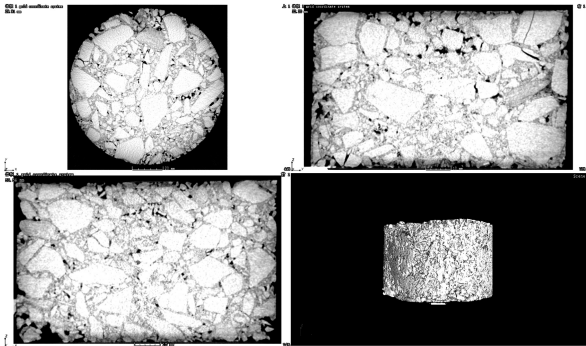


图 1 马歇尔试件三维扫描图像

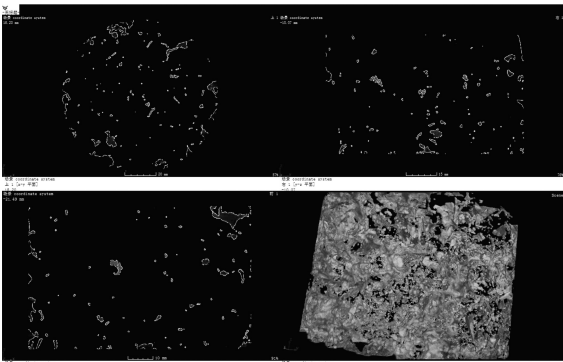


图 2 沥青混合料三维空隙分布

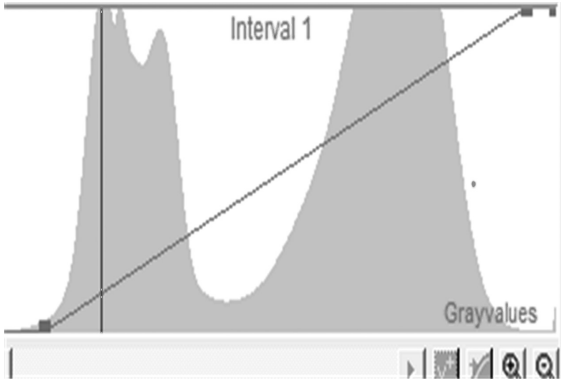


图 3 灰度直方图

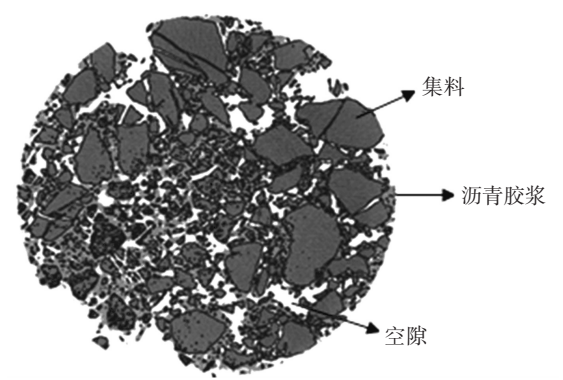


图 4 沥青混合料三值化图像

2.3 试验极差分析

极差分析法又称直观分析法<sup>[16]</sup>,通过极差分析可以判断出影响因素的主次、最优水平以及试验过程中的最佳试验方案组合。

分别计算表 4 中每一列上水平号为  $i$  所对应的试验结果之和  $K_i$ , 每一列上水平号为  $i$  的试验结果算术平均值  $k_i$ , 每一列的极差  $R = \max \{ k_1, k_2, k_3 \} - \min \{ k_1, k_2, k_3 \}$ ,  $R_j$  反映了第  $j$  列因素的水平变动时, 试验指标的变动幅度.  $R_j$  越大, 说明该因

素对试验指标的影响越大. 从表 4 中可知, 每一列极差分别为  $R_A = 5.06, R_B = 2.85, R_C = 2.93, R_A > R_C > R_B$ , 则各因素从主到次的顺序为: 电压 / 电流值, 滤波片种类, 级配类型. 分别将因素水平为横坐标, 以试验指标平均值  $k_i$  为纵坐标, 画出试验因素与指标的趋势, 如图 5 所示。

可见, 测试的沥青混合料的空隙率随着扫描电压 / 电流值的升高, 空隙率降低, 更加接近计算空隙率; 随着级配类型的变化, 沥青混合料的公称最大粒径变大, 测得的空隙率与计算空隙率的偏离越大; 当加载在 X 射线出口处的滤波片变化时, 随着滤波片种类及厚度的不同, 测试空隙率的大小也随之变化。

将同一级配马歇尔试件的计算空隙率与实测的空隙率相比较, 如图 6 所示, 其中图 6(a)、6(b)、6(c) 分别为不同级配类型下的计算空隙率与实测空隙率比较图. 可以看出, 3 种级配下与计算空隙率相差最小的试验编号分别为 7#、8#、6#. 分别截取扫描中的断层图像, 如图 7 所示。

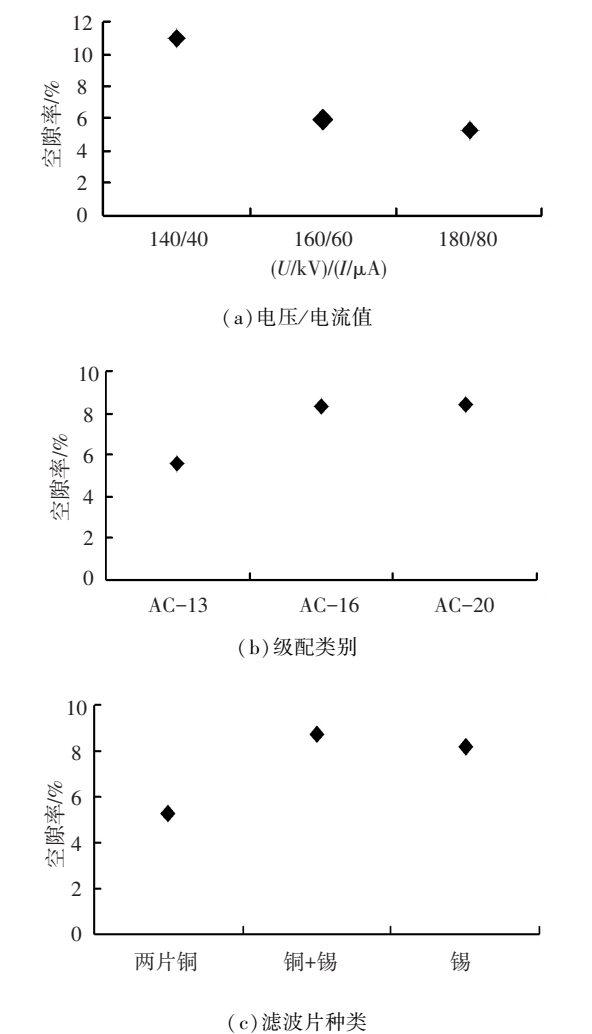


图 5 试验因素与空隙率趋势图

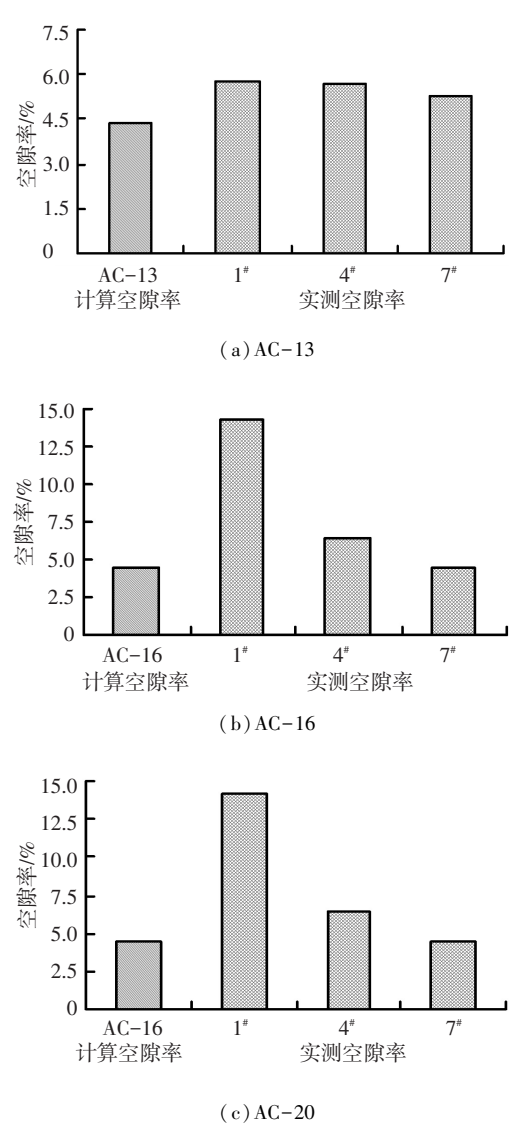


图 6 空隙率对比图

图 7 为试验扫描断层图像,对于同一种级配,扫描电压、电流越高,其重构后实测的空隙率越接近于计算空隙率.电压、电流值增大,工业 CT 成像精度越高,重构后的三维图像更加真实准确,图像噪声点少,图 7(b)、7(e)对比,更接近于真实试件存在状态;细观尺度下实测空隙率与马歇尔方法下计算空隙率偏差较小,两者的相关性较好.

随着级配类型的变化,沥青混合料的公称最大粒径逐渐变大,扫描成像的过程中,需要更高能量的 X 射线才能对其进行穿透.而当电压、电流过低时,或者滤波片的吸收能量作用比较强时,透过沥青混合料试件的射线能量较低,成像后的图像噪声点较多,在进行三维重构空隙识别时,会将噪声点误识别为空隙,使得所测的空隙体积偏大.因此,随着公称最大粒径的增大,在对试件进行扫描的过程中,要增大电压、电流值,选用合适的滤波片,抑制噪声点的出现,从而提高测试精度.

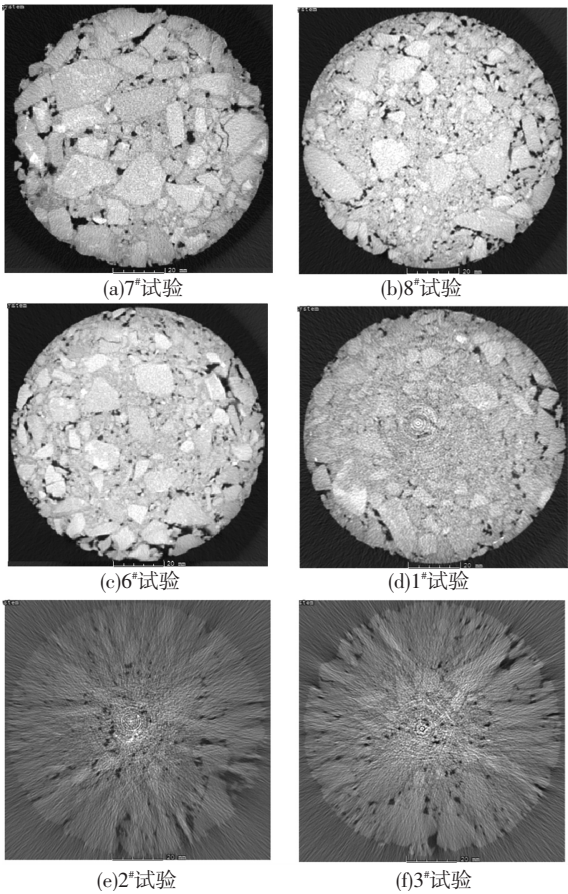


图 7 试验扫描断层图像

加在 X 射线放射口的滤波片的作用是减少低能射线部分所占的比例,防止发生射束硬化产生环状伪影.由图 5 中载玻片种类与空隙率关系可以看出,当采用两张铜片叠加组合时,所测得空隙率与实际情况具有较好的相关性,与马歇尔试验下的结果相符;而当采用铜、锡滤波片时,测得空隙率偏差较大,原因是锡的吸能效果较铜片高很多,使透射试件的射线能量降低,产生较多的噪声点,在计算过程中同样会出现误差.

2#、3#试验结果的空隙率偏差最大,这是由于电压、电流偏低,且滤波片的吸能比较强,导致扫描后的灰度图像并没有出现预期的两个波峰的形状,在计算空隙体积时,在确定空隙与沥青混合料阈值时出现误差.如图 8、9 所示.而结果偏差最小的 8#试验的灰度图像如图 10 所示,可以看出,灰度图像具有明显的双峰结构,可以较好地区分出沥青混合料与空隙的阈值,其扫描图像噪声点少,如图 7(b)所示,图像清晰,因而计算结果较为准确.

2.4 试验方差分析

方差分析,又称变异数分析或 F 检验,通过分析研究不同来源的变异对总变异的贡献大小,从而确定可控因素对研究结果影响力的大小.

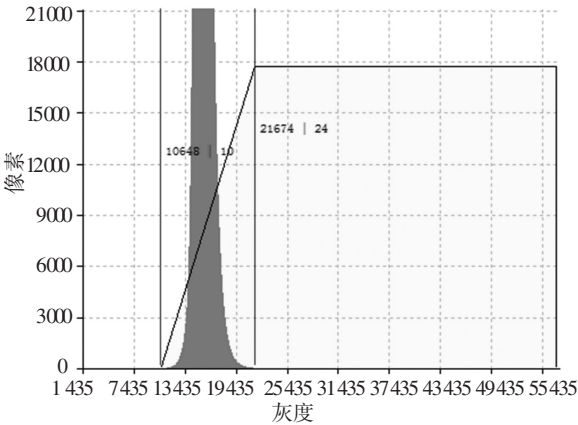


图 8 2<sup>#</sup> 试验图像灰度图

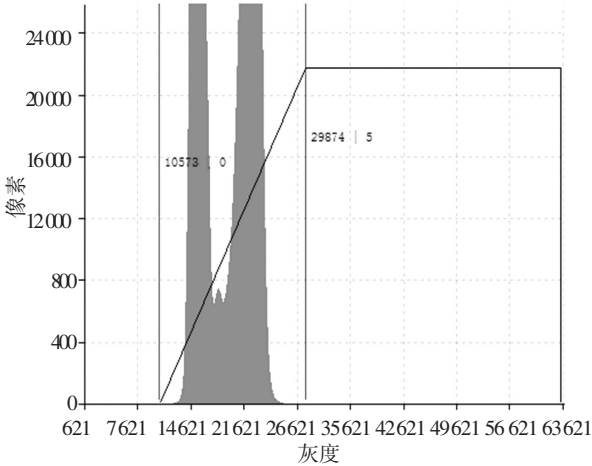


图 10 8<sup>#</sup> 试验图像灰度图

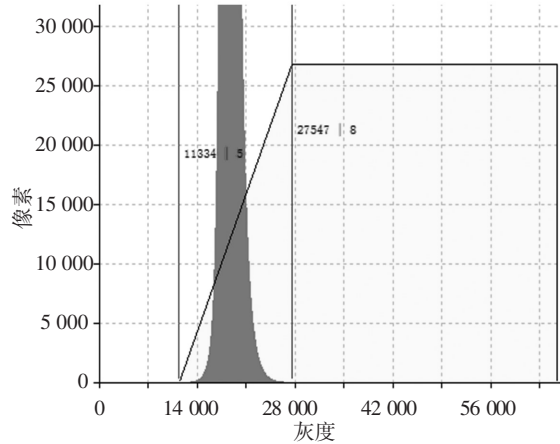


图 9 3<sup>#</sup> 试验图像灰度图

分别计算总离差平方和  $SS_T$ 、各因素引起的离差平方和  $SS_j$ 、试验误差的平方和  $SS_e$ 、自由度  $df_j$ 、平均离差平方和  $MS_j$ 、以及  $F$  值,分列于表 5 中.其中,误差分别为  $SS_e = 8.1041$ ;  $df_e = 2$ ;  $MS_e = 4.052$ .查得临界值表  $F_{0.05}(2,2) = 6.94$ ,由表 5 可知,  $F_A = 7.181$ ,  $F_A > F_{0.05}(2,2)$ ,说明电压 / 电流值对试件扫描重构后的准确度具有显著的影响,而级配类型与滤波片的影响较电压 / 电流的影响小.表 4 中试验 8# 中,空隙率为 4.4%,最接近于实际中马歇尔试件的空隙率.

表 5 方差分析表

| 差异源     | $SS_j$    | $df_j$ | $MS_j$    | $F_j$     | 显著性 |
|---------|-----------|--------|-----------|-----------|-----|
| 电压 / 电流 | 58.196 16 | 2      | 29.098 08 | 7.181 026 | * * |
| 级配类型    | 15.819 76 | 2      | 7.909 878 | 1.952 055 | *   |
| 滤波片种类   | 20.626 02 | 2      | 10.313 01 | 2.545 117 | *   |

3 结 论

1) 基于 X-ray CT 技术和数字图像处理手段,对马歇尔试件进行扫描并三维重构,可以计算出集料、沥青胶浆、空隙的体积组成,实现了沥青混合料空隙率计算的数字化,由于考虑了沥青混合料内部三维组成结构,相比马歇尔方法下计算的空隙率,利用工业 CT 技术测试空隙率将会更有利于沥青混合料力学特性的研究.

2) 沥青混合料扫描重构的准确性依赖于 CT 机的参数配置.当沥青混合料的最大公称粒径增大时,要适当加大扫描电压、电流值.电压的大小决定了 X 射线透射试件的能力,电流的大小决定了扫描试件重构后不同材料的对比度.基于本研

究,对标准马歇尔试件最优的扫描配置为:电压 / 电流为 180 kV/80  $\mu$ A,滤波片为 2 片铜片叠加组成.

3) 由试验结果可以发现,基于细观尺度与宏观尺度得到的沥青混合料空隙率具有良好的相关性,在优化参数配置的情况下,测试结果的差异性较小,为进一步开展沥青混合料细观结构方面研究奠定了基础.

参考文献

[1] 裴建中.沥青路面细观结构特性与衰变行为[M].北京:科学出版社,2010:1-3.

[2] MASAD E, MUHUNTHAN B, SHASHIDHAR N, et al. Quantifying laboratory compaction effects on the internal

- structure of asphalt concrete [ C ]//Transportation Research Record 1681. Washington DC: TRB, 1999: 179-185.
- [ 3 ] TASHMAN L, MASAD E, PETERSON B, et al. Internal structure analysis of asphalt mixes to improve the simulation of superpave gyratory compaction to field conditions [ J ]. Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologists, 2001, 70: 605-645.
- [ 4 ] WANG L B, WANG Y, MOHAMMAD L, et al. Voids distribution and performance of asphalt concrete [ J ]. International Journal of Pavements, 2002, 1( 3 ): 22-33.
- [ 5 ] ARAMBULA E, MASAD E, MARTIN A E. Influence of air void distribution on the moisture susceptibility of asphalt mixes [ J ]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2007, 19( 8 ): 655-664.
- [ 6 ] AL-OMARI A, TASHMAN L, MASAD E, et al. Proposed methodology for predicting HMA permeability [ J ]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2002, 71( 2 ): 30-58.
- [ 7 ] TASHMAN L, WANG L, THYAGARAJAN S. Microstructure characterization for modeling HMA behavior using imaging technology [ J ]. Road Materials and Pavement Design, 2007, 8( 2 ): 207-238.
- [ 8 ] 吴文亮,李智,张肖宁.用数字图像处理技术评价沥青混合料均匀性[ J ]. 吉林大学学报:工学版,2009, 39( 4 ): 921-925.
- [ 9 ] 吴文亮,王端宜,张肖宁,等. 沥青混合料级配的体视学推测方法[ J ].中国公路学报,2009, 22( 5 ): 29-33.
- [ 10 ] 王旭东,应鹏程. 沥青混合料空隙率的研究[ J ]. 重庆交通学院学报,2000,19( 4 ): 18-21.
- [ 11 ] JTG E20—2011. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[ S ]. 北京:人民交通出版社,2011.
- [ 12 ] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[ M ].北京:化学工业出版社,2012:124-170.
- [ 13 ] 张肖宁.基于 X-ray CT 的沥青混合料计算机辅助设计技术的研究进展[ J ]. 交通科学与工程,2010( 6 ): 1-8.
- [ 14 ] KRANZ R L. Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite [ J ]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16( 1 ): 37-47.
- [ 15 ] 段跃华.基于 X-ray CT 的沥青混合料粗集料基础特性研究[ D ].广州:华南理工大学,2011.
- [ 16 ] JTG F40—2004.公路沥青路面施工技术规范[ S ].北京:人民交通出版社,2004.

(编辑 魏希柱)