

# 基于 X-CT 技术的多孔排水沥青混合料 空隙竖向分布特性

裴建中<sup>1</sup>, 王富玉<sup>2</sup>, 张嘉林<sup>1</sup>

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 西安 710064; 2. 吉林大学 交通学院, 长春 130022)

**摘要:**采用 X-CT 技术、数字图像处理技术与分形理论相结合对多孔沥青混合料空隙的竖向分布特性进行了研究, 结果表明: 空隙特征图像可以定性描述多孔沥青混合料的连通情况和分布特性, 多孔沥青混合料中没有面内连通情况; 所研究的 6 个截面空隙率分布范围为 17.7%~22.2%; 不同截面的空隙数量最大相差 16 个, 约占空隙总量的四分之一; 空隙轮廓分维数均大于其相应的空隙面积分维数, 且与空隙数量和空隙率无关。空隙级配图显示, 同一试件内两个正交截面空隙的级配大多分布在 4~8 mm 内, 但分布形态各异。经对比分析发现, 横向空隙与竖向空隙除最大直径相差 2 mm 外, 等效直径分布较为接近。

**关键词:** 道路工程; 空隙分布特性; X 射线 CT 技术; 多孔排水沥青混合料

**中图分类号:** U414.103 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-5497(2009)Sup. 2-0215-05

## Characteristic of vertical distribution of porous asphalt based on X-ray computed tomography imaging techniques

PEI Jian-zhong<sup>1</sup>, WANG Fu-yu<sup>2</sup>, ZHANG Jia-lin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China)

**Abstract:** The research on the vertical distribution of air voids of porous asphalt mixture was carried out using X-CT technique, digital graphic processing technique and the fractal theory. The results show that the void features images are able to describe the connectivity and distribution characterization of porous asphalt mixture and there is no in-plane connectivity in it; the air voids of the six sections studied ranges from 17.7% to 22.2%; the greatest discrepancy of air void quantity among different sections is 16, accounting for about one-quarter of the total quantity; all the air void profile fractal dimension are larger than the corresponding air void area fractal dimension, and it has nothing to do with air void quantity. The air void gradation figure shows that the gradations in two orthogonal cross-section mostly distribute within 4~8 mm in the same sample, but with different distributional pattern. The contrastive analysis find that the discrepancy of maximum diameter between transverse air void and vertical air void is 2 mm with relatively close equivalent diameter.

**Key words:** road engineering; distribution characterization of air voids; X-ray CT technique; porous

**收稿日期:** 2008-02-12.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50608006); 陕西省自然科学基金项目(2007E223); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0120); 吉林大学交通学院青年教师基金项目.

**作者简介:** 裴建中(1976-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 道路工程. E-mail: jianzhongpei@163.com

**通信作者:** 王富玉(1975-)女, 讲师, 博士. 研究方向: 道路工程. E-mail: wfy@jlu.edu.cn

drainage asphalt mixture

空隙是沥青混合料的固有特征,直接影响路面的路用性能和长期使用性能。而目前采用的沥青混合料设计方法中只有 VV、VCA、VMA 等参数,这些参数并不能客观地反映沥青混合料空隙的所有内涵和外延,由此导致不能解释实践中出现的许多问题的深层原因。因此,关于沥青混合料内部结构的研究是目前该领域研究的热点之一。文献[1,2]采用图像技术研究了沥青混合料的空隙分布状态,以及集料的方位分布、接触状态、形状特性、混合料的渗透性、裂缝分布、微观结构的三维重构和微观结构的演化;文献[3]采用声音吸收频谱研究了排水沥青路面空隙的内部结构和功能,并预测了排水沥青路面的渗透性能;文献[4]应用线弹性材料理论模拟恒温下沥青混凝土,研究了两种空隙衰减情况:一种是在恒载下空隙体积的渐近衰减,另一种则达到了极限空隙率;文献[5]采用重正化群方法分析并确定了透水表面层所形成连通空隙的临界空隙率为 17.33%;文献[6]采用灰关联分析法分析了矿料级配、沥青性质、沥青质量分数、毛体积密度、吸水率等指标对沥青混合料空隙率的影响程度,并得出各相关因素对沥青混合料空隙率影响程度的排序结果。此外,在不同领域中,由于空隙分布的复杂性,众多研究者进行了研究,建立了很多空隙分布数学模型和空隙分布的衰变模型,但由于这些模型方法各异,精度与性能不一,大多只适用于其最初的基础行业,不能直接应用于沥青混合料的空隙空间分布分析。

作者选用空隙率较大的排水沥青混合料作为载体,采用 X-CT 技术、数字图像处理技术和分形理论相结合的方法对沥青混合料的空隙空间信息进行深入研究。

### 1 研究方法与技术途径

由于 X-CT 技术<sup>[7-8]</sup>可以无损探测物体的微观结构,数字图像处理技术可以对 CT 图像进行数字解析,而分形理论<sup>[9-10]</sup>在不规则、不均匀的材料分析中具有优势,因此本文将三者相结合进行沥青混合料空隙的研究。

对于排水沥青混合料的截面图像,本研究所关心的是图像中有关空隙与集料的信息,如空隙与集料的级配、表面纹理、截面熵的分布状态等,

因此将图像提供的这类信息称之为“对象”,而将混合料图像中其余的部分称之为“背景”。对沥青混合料截面图像的认识就是将图像中的对象有效地从背景中分离出来。而图像处理的目的就是使图像识别这一过程更加方便,使分离的结果更加精确。

混合料图像处理主要由两部分组成:硬件控制部分,负责控制图像采集和图像记录等工作;人机交互部分,主要包括参数的设置、图像识别、处理结果的输出等。其工作流程如图 1 所示。

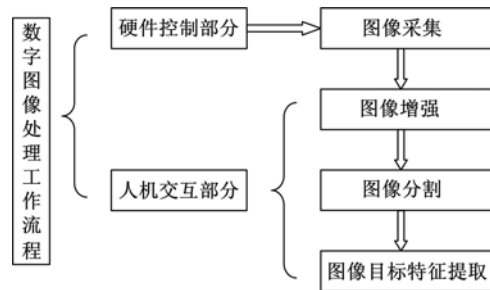


图 1 数字图像处理工作流程

Fig. 1 Flow chart of digital graphic processing

### 2 分析方案

为了了解沥青混合料空隙竖向分布情况,采用 OGFC-13 马歇尔试件进行研究。试验中所采用的级配如表 1 所示,沥青用量 5.0%,改性剂为日本产 TPS,掺加比例为 12%。

表 1 矿料级配设计

Table 1 Aggregate gradation

项目	通过下列筛孔(mm)的百分率/%									
	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
级配	100	96.2	67.3	29.2	18.3	11.4	8.4	6.2	5.3	4.6
级配 上限	100	100	80	30	22	18	15	12	8	6
级配 下限	100	90	60	12	10	6	4	3	3	2

为了进行竖向分析,对马歇尔成型试件进行 CT 扫描,扫描位置见图 2,分别对图中的 6 个截面进行扫描,截面之间的间距为 2 mm。

### 3 结果分析

#### 3.1 空隙特征提取图像分析

对上述级配的 CT 图像进行处理,其空隙特

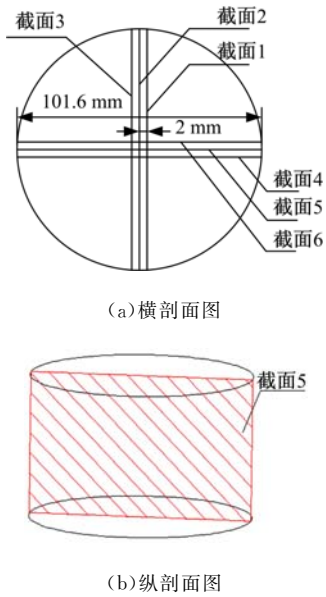


图 2 纵断面扫描位置示意图

Fig. 2 Scanning sketch map of vertical section

征提取图像见图 3。

由图 3 分析可知,空隙在平面内的分布不均匀,靠近试件四周的空隙较大;空隙的形状不规则,简单分析并无规律可言;竖向剖面中未见面内连通空隙,大部分是封闭的非连通空隙,且大于试件高度一半的半连通空隙在一些试件中出现,同时这些半连通空隙均靠近试件两侧,这可能与试件的成型方法有关。

进一步分析可得,空隙是指混合料总体积扣除固体骨架所占体积后的剩余部分,它由三部分组成,即连通空隙、半连通空隙以及封闭非连通空隙。从排水角度看,空隙连通情况又分为面内连通和面外连通,面内连通见图 4,全连通可以有效排水,而对于非连通情况还需考察在面外(即三维空间)的情况,有可能在面外连通,此时空隙有效;有可能在面外不连通,此时空隙无效。

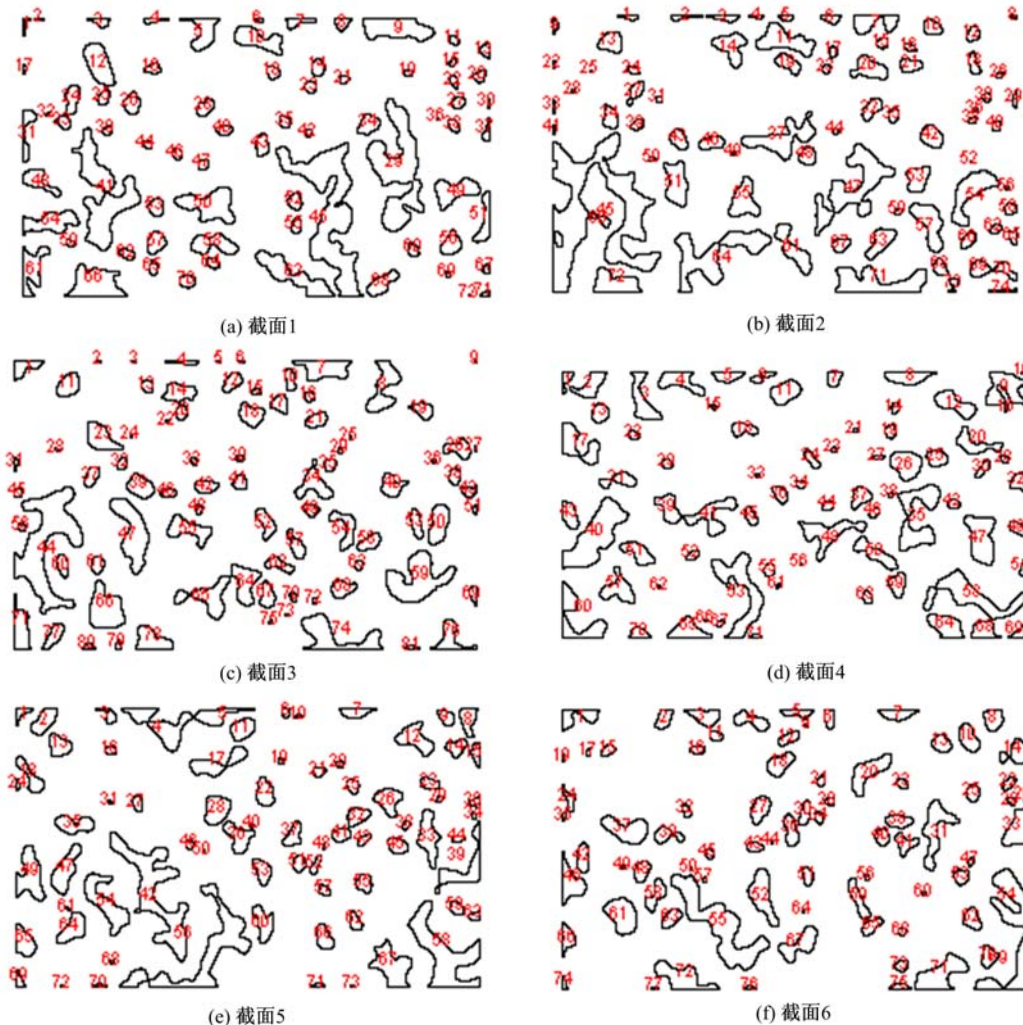


图 3 空隙特征提取图像

Fig. 3 Image characterization extracted from air void feature

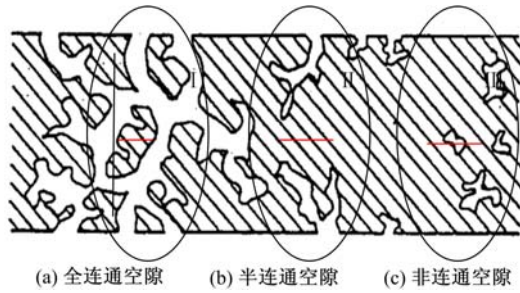


图 4 多孔排水沥青混合料空隙面内连通情况

Fig. 4 Condition of in-plane connectivity of air void

### 3.2 空隙特征参数分析

图 3 中截面 1~截面 6 经处理后,得到的空隙分布参数见表 2。

表 2 空隙竖向分布 CT 图像参数

Table 2 Parameters of CT image for vertical distribution of air void

图像编号	空隙率/%	空隙数量/个	空隙轮廓分维数	空隙面积分维数
截面 1	22.2	68	1.1473	1.0041
截面 2	21.8	74	1.1474	1.0024
截面 3	19.1	84	1.1389	0.9974
截面 4	19.9	68	1.1581	1.0127
截面 5	20.4	73	1.1521	1.0071
截面 6	17.7	75	1.1562	1.0174

采用空隙率、空隙轮廓分维数与空隙面积分维数等参数可以分析多孔排水沥青混合料中空隙竖向的分布情况。从表 2 中可以看出,6 个截面的空隙率分布范围为 17.7%~22.2%,空隙率平均值为 20.2%,与试件的目标空隙率 19.1%较为接近;不同截面的空隙数量从 68 个到 84 个不等,但是空隙的数量多少与空隙率并没有必然的联系,对于截面 1,空隙数量最少,但空隙率最大,而截面 2、5 和 6,空隙数量基本相同,但空隙率相差较大。

分维数是对分形几何填充空间的程度的度量,从测度论和对称理论方面刻画了集合的无序性,是描述对象复杂程度的一个特征量。结果显示,对于多孔沥青混合料,其空隙轮廓分维数大于空隙面积分维数,空隙轮廓分维数的分布区间为 1.1389~1.1581,空隙面积分维数的分布区间为 0.9974~1.0074。

### 3.3 空隙竖向级配分析

图 5 为截面 2 与截面 5 空隙级配图。结果显示,在相互垂直的两个截面上,空隙的最大等效直径相同,均为 13 mm。截面 5 空隙等效直径分布

范围较小,主要分布在 4~8 mm,占全部空隙的 57.4%,空隙呈正态分布;而截面 2 的空隙等效直径分布范围较大,并不连续,出现了双峰特征,等效直径在 4~5 mm 内空隙数量占总空隙的 20.9%。

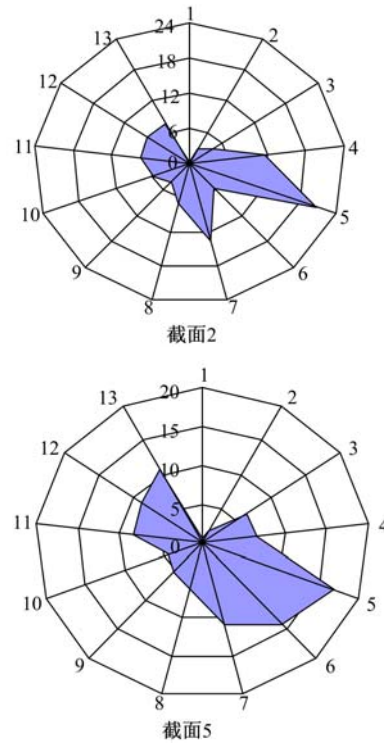


图 5 竖向分布空隙级配图

Fig. 5 Vertical distribution of air void gradation

### 3.4 竖向空隙与横向空隙对比分析

为了分析沥青混合料空隙率横向与竖向分布的区别,本文继续采用该组试件,对试件横断面进行扫描,扫描方式如前所述。结果显示横向空隙等效直径为 4.425~4.647 mm,竖向空隙等效直径为 4.198~4.520 mm。横向空隙级配如表 3 和图 6 所示。

表 3 同一试件空隙横向分布和竖向分布级配

Table 3 Transverse and vertical distribution gradation of air void for the same sample

空隙直径范围/mm	横向空隙/%	竖向空隙/%	空隙直径范围/mm	横向空隙/%	竖向空隙/%
$d \leq 1$	0.2	0.4	$7 < d \leq 8$	8.9	6.2
$1 < d \leq 2$	3.2	1.6	$8 < d \leq 9$	5.1	5.0
$2 < d \leq 3$	6.2	6.5	$9 < d \leq 10$	8.9	4.4
$3 < d \leq 4$	12.7	6.5	$10 < d \leq 11$	5.5	8.2
$4 < d \leq 5$	17.5	16.8	$11 < d \leq 12$	0	8.8
$5 < d \leq 6$	20.7	14.2	$12 < d \leq 13$	0	10.6
$6 < d \leq 7$	11.1	10.8			

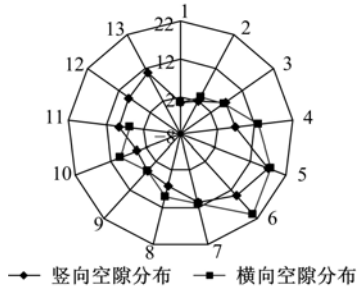


图 6 试件横向分布空隙级配图

Fig. 6 Transverse distribution of air void gradation

通过表 3 与图 6 的比较可以发现,空隙的竖向分布参数如空隙率、空隙轮廓分维数、空隙面积分维数均比横向分布要大。竖向最大空隙等效直径为 13 mm,大于横向最大空隙等效直径 11 mm;如果排除试件成型过程中的材料因素和人为因素,可以认为二者均服从正态分布,中心空隙直径均为 4~6 mm。

### 3.5 空隙轮廓分维数与面积分维数关系分析

将本文所提取空隙轮廓分维数与面积分维数进行对比,如图 7 所示。

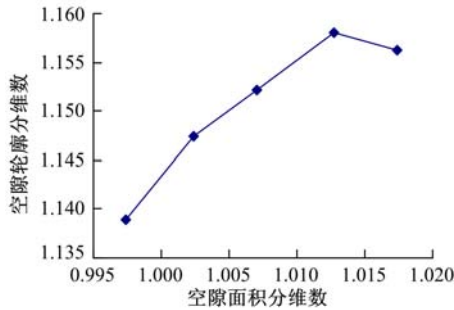


图 7 空隙轮廓分维数与面积分维数关系

Fig. 7 Relationship between fractal dimension of profile and fractal dimension of area

从图 7 可以看出,空隙轮廓分维数与面积分维数之间基本呈线性关系,且轮廓分维数均大于面积分维数,即空隙面积表述越不规则,其轮廓可能更复杂。

## 4 结束语

分形理论与 X-CT 技术可以有效评价多孔排水沥青混合料空隙分布特性。通过上述方法获取的空隙特征图像、空隙特征参数以及空隙竖向分布级配能较准确地反映多孔排水沥青混合料的空隙空间信息,有助于深入分析实践中沥青路面出现的诸多问题。

### 参考文献:

[ 1 ] 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.

[ 2 ] Tashman L, Wang L, Thyagarajan S. Microstructure characterization for modeling HMA behaviour using imaging technology[J]. Road Materials and Pavement Design,2007,8 (2):207-238.

[ 3 ] Hokari Kozo, Maruyama Teruhiko, Ohkawa Hideo, et al. Fundamental study on void structure of the drainage asphalt pavement [C] // Doboku Gakkai Rombun-Hokokushu/Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, 1994: 69-76.

[ 4 ] Murali Krishnan J, Rengaraju V R. Air voids reduction phenomena of asphalt concrete—a continuum approach [J]. International Journal of Fracture, 1999, 97(1): 337-354.

[ 5 ] 李国强,邓学钧. 路面透水表层临界空隙率研究[J]. 中国公路学报,1996,9(2): 28-33.  
Li Guo-qiang, Deng Xue-jun. Research on critical porosity of pavement porous course[J]. China Journal of Highway and Transport,1996,9(2): 28-33.

[ 6 ] 李艳春,孟岩,周骊巍,等. 沥青混合料空隙率影响因素的灰关联分析[J]. 中国公路学报,2007,20 (1): 30-34.  
Li Yan-chun, Meng Yan, Zhou Li-wei, et al. Grey relation degree analysis of influence factors on asphalt mixtures voids[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(1): 30-34.

[ 7 ] 刘培生. 多孔材料引论[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[ 8 ] 朱卫华,印友法,陈栋梁,等. 多孔材料孔界面分形结构小角度 X 射线散射实验[J]. 物理测试,2000,6 (6): 11-13.  
Zhu Wei-hua, Yin You-fa, Chen Dong-liang, et al. Fractal properties of pore surface in porous materials by the small angle X-ray scattering technique[J]. Physics Examination and Testing,2000,6 (6): 11-13.

[ 9 ] Adhara Castelblanco Torres. Probabilistic anslysis of air void structure and its relationship to permeability and moisture damage of hot mix asphalt[D]. College Station: Texas A&M University,2004.

[ 10 ] Saouma V C, Barton C C. Fractals, fracture and size effect in concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120(4): 835- 854.