室内成型试件与路面芯样的抗车辙差异性评价

张肖宁, 肖 鑫

(华南理工大学 土木与交通学院, 510640 广州)

摘 要: 为了评价室内成型试件与路面芯样抗车辙能力的差异,利用多轮车辙仪(RLWT)获取车辙变形量,从宏观角度研究室内成型试件与路面芯样的抗车辙能力;采用工业CT获取沥青混合料断面扫描图像,从细观角度探讨室内成型试件与路面芯样的粗集料颗粒与面空隙率沿深度方向的分布状况.结果表明:由于压实方式不同,两种试件的空隙率相差甚大,从而导致其抗车辙能力也有明显差异;路面芯样的粗集料颗粒与面空隙率在深度方向分布的均匀性较差;路面芯样的平均面空隙率及上端的面空隙率明显大于室内成型试件,从细观角度证明了宏观研究成果的准确性.

关键词: 道路工程;路面芯样;工业CT;空隙率分布;车辙

中图分类号: U416.217 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2014)08-0084-06

Evaluation of rutting resistance differences of indoor samples and pavement cores

ZHANG Xiaoning, XIAO Xin

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, 510640 Guangzhou, China)

Abstract: To evaluate the rutting resistance differences of indoor samples and pavement cores, Rotary Loaded Wheel Tester (RLWT) was used to acquire rutting deformation, and rutting resistance of indoor samples and pavement cores was researched from the macro perspective. Industrial CT was utilized to obtain asphalt mixture sectional scanning images, the distribution along the depth direction of coarse aggregate particles and area porosity of indoor samples and pavement cores from the micro angle were explored. The results show that the air porosity of the two kinds of samples vary greatly due to the different manners of compaction, leading to the significant discrepancy in the capability of rutting resistance. The uniformity of the distribution along the depth of coarse aggregate particles and area porosity of pavement cores are poor, and the average area porosity and area porosity in the upper part of the pavement cores are obviously greater than those of indoor samples, which proves the accuracy of the macro research from the micro perspective.

Keywords: road engineering; pavement core; industrial CT; area ratio of air void; rutting

车辙是我国沥青路面主要的损坏形式之一,目前评价沥青路面抗车辙能力的方法大多都是在室内成型的沥青混合料上进行的,实际沥青路面中的沥青混合料由于在施工过程中受到各种因素的影响,往往会在性能指标和参数上与室内设计出的沥青混合料存在较大差异,单一利用室内成型的沥青混合料不能全面反映沥青路面的抗车辙能力[1-2].近年来,英美德等国已开始采用现场路面芯样评价沥青路面的抗车辙能力,在国内此项研究也已展开[3-4].这些研究只单纯描述了路面芯样的车辙变形特征,并没有对室内成型试件与路面芯样抗车辙能力的差异进行评价.如何考虑两者之间的差异以及使两者达到更好的相关性,有待进一步研究.

沥青混合料是由集料、沥青和空隙形成的复杂多相非均匀材料[5],其性能不仅受沥青、集料和空隙体积含量的影响,还与这些因素的空间分布相关[6-7].由于技术限制,以往的研究无法分析

收稿日期: 2013-10-06.
基金项目: 国家重大科技支撑计划项目(2011BAG07B03).
作者简介: 张肖宁(1951—),男,教授,博士生导师.
通信作者: 肖 鑫, xiaoxin5230302@sina.com.

各组成因素的空间分布特征，常假定沥青混合料为均匀实体[8-9]. 近年来，随着数字图像技术的快速发展，利用工业 CT 进行沥青混合料的细观结构研究成为可能，并将逐渐成为研究沥青路面复杂行为的切入点和着力点[10-13]. 鉴于此，为了更真实表征实际沥青路面的抗车辙能力、更全面描述沥青混合料内部的相关信息，本文从宏观和细观两个角度对室内成型试件与路面芯样的抗车辙性能进行对比研究，探讨造成两者之间差异的主要原因，寻求有效措施提高两者之间的相关性，为更好地提高实际沥青路面的抗车辙能力提供依据.

1　室内成型试件与路面芯样抗车辙能力的宏观对比评价

1.1　试件制作与试验方法

路面芯样来自在建高速公路，其路面结构形式为：上面层厚度 4 cm，级配为 AC-13，采用改性沥青，集料为玄武岩；中面层厚度 6 cm，级配为 AC-20，沥青为普通沥青，集料采用石灰岩；下面层厚度 8 cm，级配为 AC-25，沥青为普通沥青，集料采用石灰岩.

为减少材料差异造成的影响，试验采用的室内成型试件为沥青路面施工过程中，到施工现场的摊铺位置随机抽取 8～10 kg 沥青混合料，进行保温后成型马歇尔试件. 取料的同时在取料位置处做好标记，待路面压实完成后再在此标记处钻取圆柱体路面芯样. 两种试件的厚度均为 6 cm，当厚度大于 6 cm 时切除下部多出部分.

采用多轮车辙仪（RLWT）进行试验. 因为 RLWT 可以直接对实际路面芯样和室内成型试样进行车辙试验评价，可以减少对路面结构的破坏，提高取样及试验效率. 采用 6.35 mm 车辙深度和加载次数 16 000 次（参照 NCAT 环道试验）共同控制试验终止时间，以车辙深度作为抗车辙性的评价指标[1].

1.2　试验结果分析

由于中面层是产生车辙的主要区域，且上、下面层的试验结果与中面层近似，本文主要对中面层的试验结果进行分析，中面层采用 AC-20 级配，矿料的配合比为 1#：2#：3#：4#：5#：矿粉 = 20：20：20：5：30：5，采用马歇尔试验确定最佳油石比，最终确定最佳油石比 4.2%，设计空隙率 4.5%[1]. 现场施工温度与压实度均符合规范要求. 测定试件的车辙深度与空隙率，试验结果见表 1.

表 1　车辙深度与空隙率试验结果

项目	车辙深度/mm		空隙率/%	
	路面芯样	室内成型试件	路面芯样	室内成型试件
K363+330	2.63	0.66		
	2.42	0.65		
	2.54	0.63		
	2.57	0.69		
K377+270	2.69	0.53	6.27	3.53
	2.41	0.91	5.49	5.10
	2.58	0.76	5.10	4.31
	2.51	0.74	4.71	4.71
K378+810	2.61	0.64	5.49	4.31
	1.82	0.57	5.10	3.92
	2.77	0.53	7.45	3.53
	2.89	0.72	8.24	4.31
均值	2.54	0.67	5.98	4.22
方差	0.26	0.11	1.25	0.54
变异系数	0.10	0.16	0.21	0.13

从表 1 可以看出：荷载作用 16 000 次时，路面芯样的变形量为 2.54 mm，室内成型试件为 0.67 mm，路面芯样为室内成型试件的 3.8 倍，说明路面芯样与室内成型试件的抗车辙能力存在较大的差异. 由于室内成型试件所用的混合料是在路面芯样的摊铺现场取料的，它们所用材料的性能完全一致，因此造成这种差异较大的原因是与施工过程中的各种变异性、碾压方式以及压实程度等有关.

碾压方式影响粗集料在沥青胶浆中的排列特性，从而影响粗集料在沥青混合料中的堆积状态. 在室内试验中，马歇尔成型法采用垂直力击实试件，压实过程中集料颗粒受竖向力作用. 在路面施工中，沥青面层材料摊铺后在双轮压路机的碾压及振动作用下，混合料中集料颗粒将向深度及车轮的前进方向移动或转动，在轮胎压路机作用下，还将发生搓揉作用，这样就使得室内成型试件与实际路面芯样的压实状态不一致[1].

为研究压实程度对试件抗车辙性的影响，对两种试件的空隙率进行测量，测量结果见表 1，并绘制了空隙率与车辙变形关系，见图 1. 从表 1 可知，路面芯样的空隙率与空隙率变异性明显大于室内成型试件. 初始空隙率较大时，混合料中集料颗粒之间没有完全相互嵌挤，接触点不稳定，在荷载作用下产生压密性车辙. 路面芯样的初始空隙率比室内成型试件大，在试验过程中路面芯样可能首先发生压密变形，造成试件具有相对较大的

变形量.从图1可以看出,当试件空隙率较大时抗车辙性能下降.因此,在实际施工过程中要严格控制施工质量,控制好碾压工艺,保证路面具有较高的压实度[1].根据图1的回归曲线可以看出,空隙率为4%时,室内成型试件与路面芯样的总变形量相差较大.可见除压实程度对路面车辙变形量有重要影响外,压实过程中空隙与集料的分布状况可能也是影响车辙变形量的重要因素.

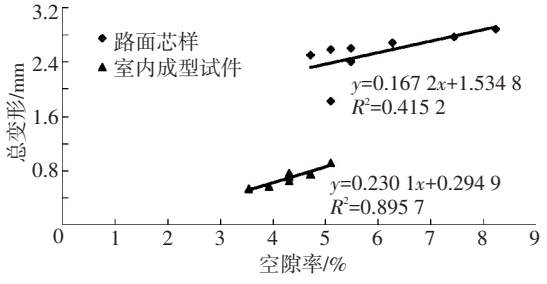


图1　试件空隙率-总变形关系

因为无法从宏观角度获取空隙与集料分布状况等细观因素的信息,下面将从细观角度,利用工业CT研究沥青混合料内部细观结构与外部抗车辙能力的关系,从新的视角探讨沥青混合料抗车辙能力的机理.

2　采用工业CT的室内成型试件与路面芯样抗车辙能力的细观分析

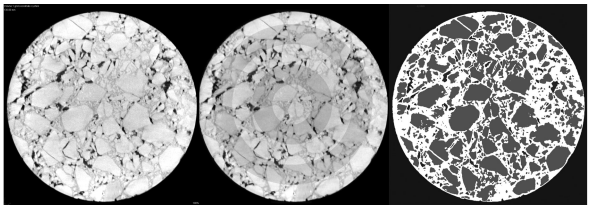
工业CT是一种利用X射线辐射成像的装置.利用X射线穿透物质时辐射强度呈指数型衰减且衰减率仅与物质密度相关的原理,将不同密度物质的射线吸收率定义为CT数(空气和水的CT数分别为-1 000 HU和0HU),建立被检测物体密度与CT数之间的换算关系并转化为对应的像素灰度值(颜色值),即可借助计算机获取非透明物体组成结构断面的数字信息[10,14].本文采用德国YXLON公司生产的Compact-225型高精度工业CT仪,其性能指标见表2[5].

表2　Compact-225型工业CT产品性能指标

射线类型	型号	能量/kV	射线源	最大成像像素	对比度分辨率/%	最高空间分辨率/mm	典型检测时间/min
X线	Compact-225	225	金属陶瓷X线管	1 024×1 024	<1	0.02	<20

2.1　沥青混合料体积组成分析与差异性物质辨识

沥青混合料由石质集料颗粒、沥青胶浆、空隙等差异性物质组成.由于沥青与集料、空隙等差异性物质交互渗透致使边界图像模糊,难以利用沥青混合料数字图像精确区分不同物质.现有的区分方法主要有最大类间方差法(大津法)、基于混合高斯模型(GMM)的EM算法和模糊C均值聚类算法(FCM)[14],在这些方法中大津法应用最为广泛.然而,由于工业CT机扫描能量的制约,工业CT沿试件厚度方向扫描时功率逐渐衰减,同类物质在试件不同位置扫描后得到的灰度值也存在较大变异,单一阈值已无法有效识别差异性物质.因此本文采用李智等[14]提出的改进的大津法进行CT图像组分识别,其原理与分割效果见图2,可以看出分割的结果中,集料边界比较清晰,能清楚地区分各组成物质,整体效果良好.



(a)分块示意　(b)子样本分割　(c)总体效果

图2　改进大津法原理与效果

2.2　沥青混合料细观结构各组分的空间分布评价

沥青混合料细观结构可以简单地认为包括如下信息:粗集料占整个试件的比例以及分布,空隙率及其空隙分布,沥青胶浆比例及其分布[14-15].由于沥青胶浆可以间接通过粗集料颗粒、空隙的分布体现,限于篇幅下文将只讨论粗集料颗粒及空隙分布在两种对比试件中的差异,对比试件同样采用中面层混合料成型的室内试件与路面芯样,各试件的参数见表3.

表3　各试件的参数

试件类型	直径/mm	高度/mm	水中重法测定空隙率/%	粗集料颗粒分布选取的断层图像数量	空隙分布选取的断层图像数量	上、下表面剔除的高度/mm
室内成型试件	101.6	63.5	5.5	40	90	3.15×2
路面芯样	100.0	60.0		40	120	6×2

注:考虑端部效应,分析中对试件的上、下表面部分进行了剔除[5],剔除高度根据扫描图像的质量确定.

2.2.1　粗集料颗粒的分布

对于圆形截面来说，采用扇形扫描方式较为合适.本文选用该方式进行扫描，见图 3.以试件截面 Y 轴正向为起点，以圆心为转轴，沿顺时针方向 θ 角为扫描角度，经分析比选，最终选定 θ 为 15°，则每个截面被划分为 24 个区域[14-15].对扫描得到的图像进行处理，调整对比度、饱和度等参数，选取图像质量较好的图像进行分析.

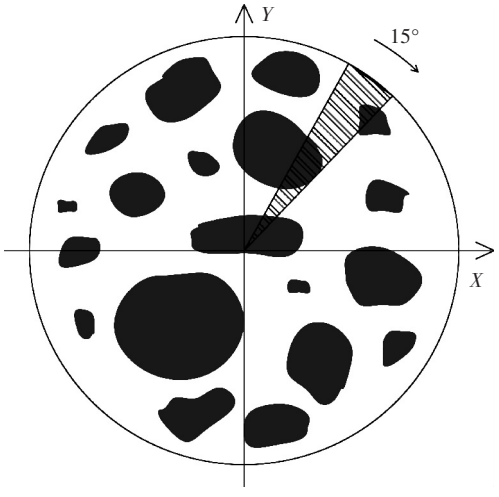


图 3　扇形扫描示意

将扇形面积内颗粒面积所占比例定义为颗粒面积比；将粗集料颗粒在扫描区域内相对中心均匀分布或离散的程度定义为粗集料颗粒面积比不均匀分布系数；将同一个试件的竖向所有切面间粗集料颗粒面积比的离散程度定义为试件颗粒竖向分布波动系数[14-15].利用颗粒面积比不均匀系数来反映截面水平面内颗粒分布状态，颗粒竖向的空间分布状态则由颗粒竖向分布波动系数来体现.如果颗粒在沥青混合料水平截面内均匀分布，则试件的颗粒不均匀性系数小，表明在平面内能够对诸多颗粒实施均匀压实作用；反之，则变异性大，压实效果不理想.同理，若沥青混合料颗粒在竖向分布的越均匀，则试件的颗粒分布波动系数就越小[14-15]，表明能够实现良好的竖向压实效果；反之，则其变异性大，压实效果也差.试验统计分析结果见表 4.从表 4 可以看出，路面芯样的不均匀系数大于室内成型试件，表明路面芯样的粗集料颗粒在水平面内分布的均匀性比室内成型试件差；路面芯样的波动系数大于室内成型试件，表明路面芯样的粗集料颗粒沿深度方向分布的均匀性较差，进而说明其在竖向的压实效果较差，因此，在荷载作用下，路面芯样产生的变形要大于室内成型试件.

表 4　颗粒面积比不均匀系数统计结果

试件类型	不均匀系数最大值/%	不均匀系数最小值/%	不均匀系数平均值/%	标准差/%	波动系数
室内成型试件	0.190	0.080	0.107	1.49	0.072
路面芯样	0.193	0.103	0.126	1.22	0.103

2.2.2　空隙率的分布

利用工业 CT 扫描获取沥青混合料试件的连续断层图像，将断层图像中的空隙面积与试件截面面积的比值定义为面空隙率[5,14-15]，并对面空隙率的分布进行统计分析，分析结果见表 5.试件面空隙率随试件深度的变化情况见图 4，图中所示曲线的试件深度为剔除端部效应后的深度，而结果分析中涉及的试件深度均包含了试件两端剔除的深度.抽取两种试件在同一深度处的原始图像，并进行阈值处理与空隙特征提取，本文共抽取 4 张图像，分别为两种试件在两个不同深度处的图像，见图 5.

表 5　空隙分布统计结果

试件类型	上部 10 mm 厚度处面空隙率/%（包含试件上端剔除的厚度）	面空隙率最大值/%	面空隙率最小值/%	面空隙率平均值/%	变异系数
室内成型试件	4.5	11.8	1.98	4.53	0.38
路面芯样	10.4	13.1	1.47	4.73	0.44

从表 5、图 4 与图 5 可以看出：

1）室内成型试件，面空隙率随深度方向不断变化，两端面空隙率较大，中间部位 21～48 mm深度范围内的面孔隙率分布较均匀，约为 2%，面空隙率最小值出现在试件中部，面空隙率分布沿试件中部基本对称.

2）路面芯样试件顶端的面空隙率最大，面空隙率随深度的增加不断减小，最小值出现在深度的 2/3～3/4 处，在底端的较小范围内（离底端约4 mm）面孔隙率又迅速增大，但小于试件顶端的面孔隙率.

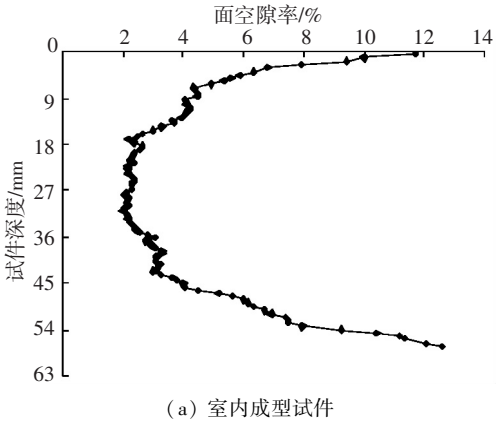
3)对试件上端的面空隙率进行统计分析发现:上部 10 mm 厚度处,室内成型试件的面孔隙率为 4.5%,路面芯样为 10.4%,路面芯样远大于室内成型试件;两种试件面空隙率大于 6% 的深度范围分别为:室内成型试件 0~7 mm,路面芯样 0~17 mm;两种试件面空隙率大于 4% 的深度范围分别为:室内成型试件 0~14 mm,路面芯样 0~20 mm.这表明路面芯样上端的面空隙率明显大于室内成型试件的面空隙率.

4)面空隙率平均值表明,路面芯样的平均面空隙率大于室内成型试件.面空隙率变异系数分析显示,相比于室内成型试件,路面芯样的面空隙分布均匀性较差.

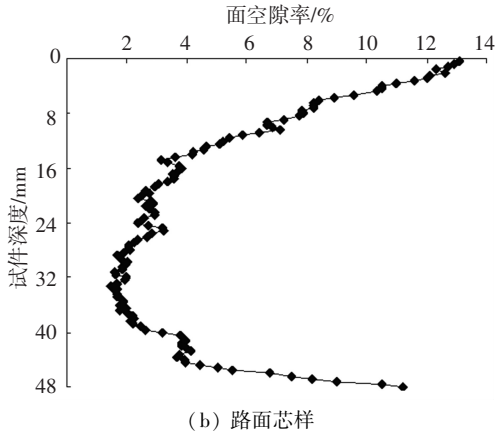
5)路面芯样图像中的空隙分布情况与其对应深度处的室内成型试件不同,路面芯样中的面空隙率及单个空隙的尺寸均比室内成型试件大.另外,同一试件在不同深度处的空隙分布呈现出某些不同,由此也可说明,空隙的分布沿试件深度方向表现出不均匀性.

通过上述的分析,可以解释两种试件车辙变形的差异:路面芯样上端的面空隙率大于室内成型试件,这就使得路面芯样在荷载作用下首先发生一定量的压密变形;路面芯样的平均面空隙率大于室内成型试件,路面芯样的粗集料颗粒与空隙分布的均匀性比室内成型试件差;压实方式与压实程度的不同,以及施工中的各种变异性;中面层所处区域承受的压缩剪切应力最大、温度高.在这些因素的综合影响下,路面芯样在荷载作用下的变形要大于室内成型试件.

沥青路面施工涉及面广,影响因素多,造成两种试件变形差异是宏观和细观各种因素综合作用的结果.要提高实际沥青路面的抗车辙能力,就得从宏观和细观两方面的影响因素着手,而在现有的技术水平上很难继续改善宏观影响因素,因此改善细观结构是关键,亦即提高沥青混合料组成材料分布的均匀性.

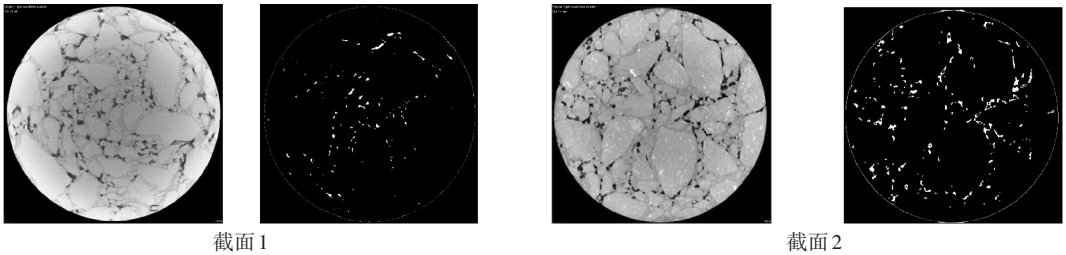


(a) 室内成型试件

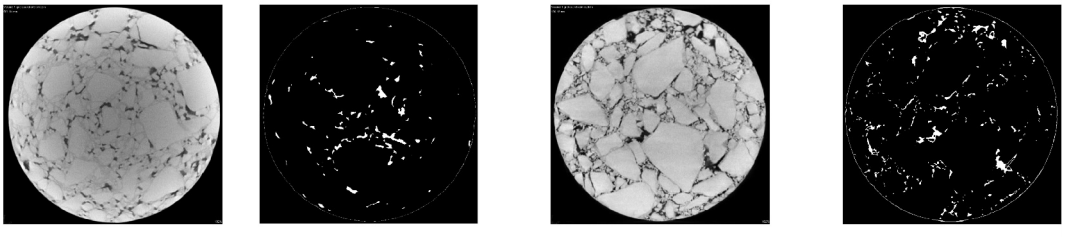


(b) 路面芯样

图 4 空隙的分布特性



(a) 室内成型试件提取空隙的图像



(b)路面芯样提取空隙的图像

图 5 不同成型方法试件的代表截面图像及空隙分布

3　结　论

1）多轮车辙试验中，荷载作用 16 000 次时路面芯样的变形量为 2.54 mm，室内成型试件为 0.67 mm，说明室内成型试件的抗车辙能力要强于路面芯样.

2）从 CT 分析结果可知，路面芯样的粗集料颗粒与面空隙率在竖向分布的均匀性较差，路面芯样的空隙体积大小、平均面空隙率及上端的面空隙率明显大于室内成型试件，从而从细观角度证明了宏观分析结果的准确性.

3）压实过程中空隙与集料分布状况的差异、压实方式与压实程度的不同、以及施工中的各种变异性是造成两种试件车辙变形差异的主要因素.

4）室内成型试件与路面芯样在抗车辙能力上存在差异，并从宏观和细观两个角度分析了造成差异的主要原因.

参考文献

[1] 咸红伟.基于路面芯样的抗车辙性能研究[D]. 广州：华南理工大学，2011.

[2] 王辉，张肖宁.基于沥青混凝土路面芯样的抗车辙性能研究[J].中外公路，2012，32(2)：65-69.

[3] 崔文社，陶晶，张争奇，等.高速公路沥青路面车辙成因试验[J].长安大学学报：自然科学版，2009，29(4)：8-12.

[4] 乔英娟，王哲人，陈静云，等.沥青结构层芯样分层变形的数字图像测量方法[J].公路交通科技，2007，24(10)：11-15.

[5] 吴文亮，王端宜，张肖宁，等. 基于工业 CT 技术的沥青混合料内部空隙分布特性[J].中南大学学报：自然科学版，2012，43(6)：2343-2348.

[6] MASAD E, AL-ROUSAN T, BATHINA M, et al. Analysis of aggregate shape characteristics and its relationship to hot mix asphalt performance [J]. Road Materials and Pavement Design, 2007, 8(2):317-350.

[7] WANG Linbing, FROST J D, LAI J S. 3D digital representation of the microstructure of granular materials from X-ray tomography imaging [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2004, 18(1):28-35.

[8] WANG Linbing. Mechanics of asphalt microstructure and micromechanics [M]. [S. l.]: The McGraw-Hill Companies, 2011.

[9] 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.

[10] 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，2010，26(2)：1-8.

[11] FU Yanrong, WANG Linbing, TUMAY M T, et al. Quantification and simulation of particle kinematics and local strain in granular materials using X-ray tomography imaging and discrete-element method [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134(2): 143-154.

[12] TASHMAN L, MASAD E. X-ray tomography to characterize air void distribution in superpave gyratory compacted specimens [J]. The International Journal of Pavement Engineering, 2002, 3(1): 19-28.

[13] DUAN Yuehua, ZHANG Xiaoning. Three-dimensional digital representation of aggregates on asphalt mixture using X-ray computed tomography [J]. Journal of Computational Information Systems, 2010, 6(13): 4391-4400.

[14] 刘佳辉.基于 OTSU 法分区图像识别技术及其在路面均匀性评价中的应用研究[D]. 广州：华南理工大学，2012.

[15] 杨献章，凌剑兴，李跃军，等.基于细观结构的沥青路面质量均匀性分析[J].公路工程，2013，38(1)：5-13.

（编辑　赵丽莹）