

多孔沥青混合料的细观空隙特征与影响规律

蒋 玮¹, 沙爱民¹, 肖晶晶², 王振军¹

(1. 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; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 基于 CT(computed tomography)、图像处理及重构技术和室内试验分析了多孔沥青混合料细观空隙特征的表征, 研究了空隙率、粗细级配和公称最大粒径等多孔沥青混合料细观特征的影响规律以及细观空隙特征同混合料性能之间的关系. 研究表明多孔沥青混合料试件断面图像的空隙等效直径、空隙面积、空隙数量、空隙分形特征同混合料的材料组成与性能密切相关; 对于空隙率相近的多孔沥青混合料, 其细观空隙特征同混合料动稳定性、飞散损失和吸声系数峰值具有良好的回归关系.

关键词: 道路工程; 多孔沥青混合料; 空隙率; 细观结构; 断层扫描技术

中图分类号: U414.1

文献标志码: A

Microscopic Void Features and Influence of Porous Asphalt Concrete

JIANG Wei¹, SHA Aimin¹, XIAO Jingjing², WANG Zhenjun¹

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

Abstract: X-ray computed tomography (CT) images were obtained and analyzed to study microscopic void features of various PAC(porous asphalt concrete)mixtures. Experimental tests were performed to research the influence of air voids, aggregate gradation and nominal maximum aggregate size on the microscopic void features and relationship between microscopic and mixture properties. It is shown by the research results that the void equivalent diameter, void area, void quantity and void distribution of PACs mixture were closely related with the mixture's material composition and performance. For the PAC with approximate air voids, mixture's microscopic void features had good regression relationship with dynamic stability, Cantabro loss as well as acoustic absorption peak.

Key words: road engineering; porous asphalt concrete; air voids; microstructure; computed tomography technology

多孔沥青混合料 (porous asphalt concrete, PAC) 是一种环保型路面材料, 在不同的地区和场合也被称为排水沥青混合料、OGFC、大孔隙沥青混合料等, 具有排水、降噪、抗滑、安全等诸多优点, 在路面工程中得到了越来越广泛的应用^[1-2]. 目前由于细观空隙特征获取相对较难, 因此在多孔沥青混合料材料组成设计中大家更关注宏观的空隙率指标, 研究多集中于空隙率变化对混合料性能和功能的影响, 而对于多孔材料, 空隙的大小、形貌、分布和复杂度对材料的力学强度和性能具有显著的影响, 因此, 需要开展多孔沥青混合料细观空隙特征的表征与影响规律研究.

对沥青混合料的细观空隙结构的研究大多基于 CT(computed tomography) 技术^[3-8]. Zelelew 等^[9]提出了一种图像处理技术用于获取混合料内部图像. Masad 等^[10]采用 CT 技术和图像分析技术研究了沥青混合料试件在不同深度范围内的空隙分布, 建立了空隙分布数学模型, 评价了沥青混合料空隙分布与水稳性的关系. Tashman 等^[11]基于 CT 技术获取了沥青混合料的空隙分布状态, 包括集料的方位分布、接触状态、形状特性、裂缝分布等微观结构参数, 认为沥青混合料的微观结构对其宏观性能有着不同程度的影响. Alvarez 等^[12]基于 CT 技术分析多孔沥青混合料试件中的空隙率的竖向分布, 建立了多孔沥青混合料渗透系数预估模型. 裴建中等^[13]基于 CT 技术对多孔沥青混合料空隙竖向分布特性进行了描述, 认为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.

多孔沥青混合料宏观材料组成和性能方面的相

收稿日期: 2014-02-11

基金项目: 国家自然科学基金(51208049); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2013JQ7013); 中国博士后科学基金特别资助(2014T70898); 交通运输部应用基础研究项目(2013319223020)

第一作者: 蒋 玮(1983—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为路面结构与材料. E-mail: jiangwei_029@sina.com

关研究较多^[14-15]. Liu 等^[16]对采用基质沥青、SBS 改性沥青、高黏度沥青制备的多孔沥青混合料性能进行了对比,认为采用高黏度改性沥青能够显著提高多孔沥青混合料的抗水损害、抗车辙和抗飞散性能. Philip 等^[17]对环氧树脂改性多孔沥青混合料进行了试验研究,得出其早期黏结强度相近或更好,抗老化性能更优. Alvarez 等^[18]基于室内的肯塔堡飞散试验、汉堡车辙试验等对多孔沥青混合料设计方法和路用性能进行了研究,推荐以肯塔堡飞散试验作为混合料设计和沥青用量确定的依据.

综上,国内外对密级配沥青混合料的细观空隙结构及多孔沥青混合料材料组成与性能已经开展了的相关研究,但针对多孔沥青混合料细观空隙结构的研究相对较少,特别是对于多孔沥青混合料细观空隙特征表征方法以及对混合料性能影响方面的研究缺乏.因此本文基于室内试验,重点研究多孔沥青混合料细观空隙特征、材料组成对混合料细观特征的影响以及细观空隙特征同混合料性能之间的关系.

1 试验材料与方案

1.1 原材料

试验采用辉绿岩集料和石灰岩矿粉,集料的主要技术指标如表 1 所示;采用 70 号基质沥青,并添加高黏度沥青改性剂,掺量为沥青质量的 12%,基质沥青及改性后沥青的主要技术指标如表 2 所示,可以看出改性后沥青的 60 °C 动力黏度大幅增加.

表 1 集料的主要技术指标

Tab.1 Main technical index of aggregate

筛孔尺寸/ mm	性能指标	测试方法 对应的规范	测试结果
10~15	体积密度	T 0304—2005	2.893 g · cm ⁻³
	吸水率	T 0304—2005	0.740%
	洛杉矶磨耗损失	T 0317—2005	14.330%
	压碎值	T 0316—2005	14.661%
	针片状含量(质量 分数)	T 0312—2005	6.910%
5~10	毛体积密度	T 0304—2005	2.861 g · cm ⁻³
	吸水率	T 0304—2005	0.892%
	洛杉矶磨耗损失	T 0317—2005	14.330%
	针片状含量(质量 分数)	T 0312—2005	8.350%
0~3	砂当量	T 0334—2005	62.300%
	毛体积密度	T 0330—2005	2.826 g · cm ⁻³

1.2 试验级配

为了评价空隙率对多孔沥青混合料细观空隙特

表 2 基质沥青和改性沥青的主要技术指标

Tab.2 Main technical index of virgin and modified asphalt

沥青	0.1 mm 25 °C 针入度	软化点/ °C	延度/cm		60 °C 动力黏 度/(Pa · s)
			5 °C	15 °C	
基质沥青	72	47		100+	276
	(60~80)	(≥46)		(≥100)	(≥180)
改性沥青	48	88	49	100+	125 352
	(≥40)	(≥80)	(≥30)	(≥80)	(≥20 000)

注:括号中数据是相应的技术要求.

征的影响,通过调整混合料中 2.36 mm 筛孔的通过率确定了 5 条级配(PAC-13a, PAC-13b, PAC-13c, PAC-13d, PAC-13e),如图 1 所示,空隙率分别为 16.1%, 18.2%, 20.1%, 22.7% 和 25.1%. 为评价当空隙率相近时,级配对混合料细观空隙特征的影响,保持 2.36 mm 筛孔通过率不变,通过调整 PAC-13c 级配中 9.50 mm 和 4.75 mm 的筛孔通过率,获得了相对 PAC-13c 级配偏粗的 PAC-13c+ 和偏细的 PAC-13c-,如图 2 所示.根据体积法测得 3 条级配的空隙率相近,均为 20% 左右.为了评价公称最大粒径对混合料细观空隙特征的影响,设计了空隙率为 20%、公称最大粒径(nominal maximum aggregate size, NMAS)为 10 mm 的级配 PAC-10,与 PAC-13c 比较,如图 3 所示.表 3 所示为试验采用的 8 条 PAC 级配,混合料的油石比根据析漏和飞散等试验综合确定.

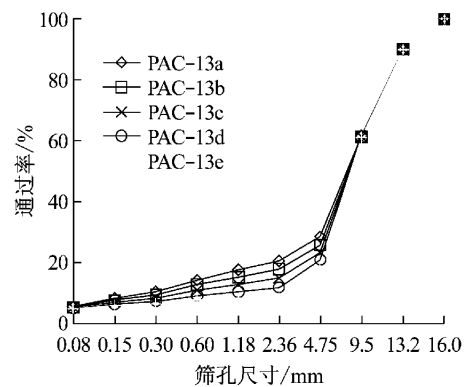


图 1 空隙率不同的混合料级配曲线

Fig.1 Gradations of aggregates with different air voids

1.3 试验方案

双面击实 50 次成型多孔沥青混合料标准马歇尔试件,采用 CT 断层扫描设备获取垂直于试件高度方向上的圆形断面图像,扫描间距为 2.5 mm,单个试件扫描 25 层,剔除端面截面后获取 25 张断面图像,尺寸为 512 像素 × 512 像素.对图像进行处理和三维重构,得到试件各层断面的细观空隙特征数据和空隙体积数据,图 4 所示为试件断面图像和三

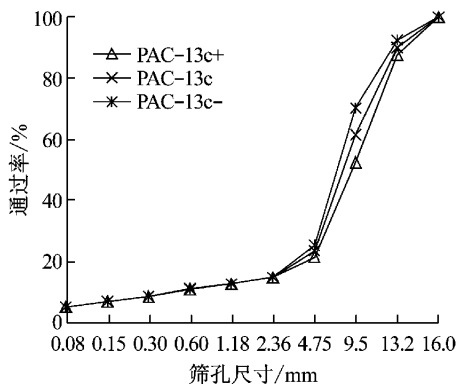


图 2 空隙率相近粗细不同的混合料级配曲线

Fig.2 Gradations of aggregates with similar air voids and different size

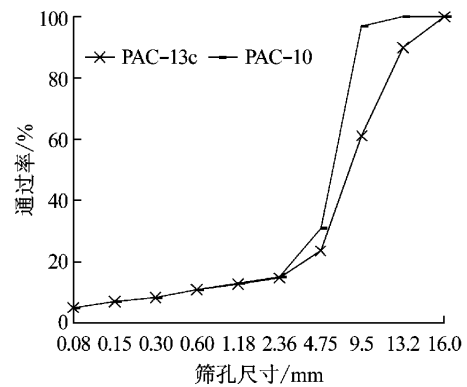


图 3 空隙率相近公称最大粒径不同的混合料级配曲线

Fig.3 Gradations of aggregates with similar air voids and different nominal maximum aggregate size

表 3 试验用多孔沥青混合料级配

Tab.3 Gradation of porous asphalt concrete for testing

混合料	通过率/%										油石比/ %	空隙率/ %
	筛孔孔径/mm											
	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.60	0.30	0.15	0.075		
PAC-13a	100.0	90.1	61.5	28.3	20.6	17.4	14.3	10.3	8.2	5.3	5.2	16.1
PAC-13b	100.0	90.1	61.4	25.8	17.7	15.1	12.6	9.3	7.6	5.2	5.0	18.2
PAC-13c	100.0	90.1	61.3	23.4	14.8	12.7	10.8	8.3	7.0	5.0	4.8	20.1
PAC-13d	100.0	90.1	61.2	20.9	11.9	10.4	9.2	7.3	6.3	4.9	4.5	22.7
PAC-13e	100.0	90.1	61.1	18.5	9.0	8.1	7.5	6.3	5.7	4.8	4.2	25.1
PAC-13c+	100.0	87.6	52.4	21.5	14.8	12.7	10.8	8.3	7.0	5.0	4.8	20.3
PAC-13c-	100.0	92.6	70.3	25.2	14.8	12.8	11.0	8.3	7.0	5.1	4.8	19.7
PAC-10	100.0	100.0	97.1	30.8	14.9	12.8	11.0	8.3	7.0	5.1	4.8	20.1

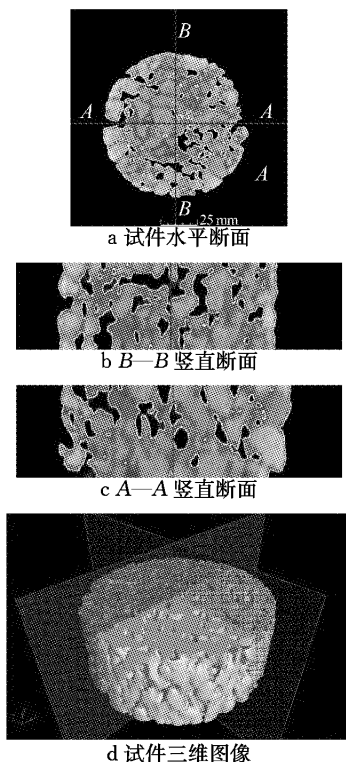


图 4 试件断面图像和三维重构

Fig.4 Cross sectional images and three-dimensional reconstruction of PAC specimen

维重构,图 5 所示为三维视图中的试件空隙分布。

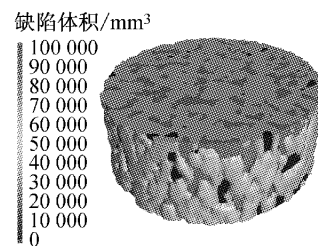


图 5 试件空隙空间分布

Fig.5 Air voids spatial distribution of specimen

通过试件断面图像分析空隙率、级配粗细、公称最大粒径对多孔沥青混合料细观空隙特征的影响规律并进一步通过轮辙试验、谢伦堡飞散试验和驻波管测吸声系数等室内试验研究细观空隙特征对混合料抗车辙性能、抗飞散性能和降噪功能的影响。

2 细观空隙特征表征

2.1 2D 断面图像特征参数

CT 扫描所得到的试件断面图像经过处理、统计和分析可以得到描述 2D 断面图像的特征参数,具体

包括:断面平均空隙数量、平均单个空隙面积、平均单个空隙的等效直径和断面平均空隙率等. 断面平均空隙数量 N 是单个试件各断面的 CT 原始图像进行阈值处理后统计得到的空隙数量加权平均值, 如式(1); 断面平均空隙总面积 A 是单个试件各断面的 CT 原始照片进行阈值处理后统计得到的空隙总面积加权平均值, 如式(2); 平均单个空隙面积 a 、空隙等效直径 d 分别通过式(3)、式(4)进行计算.

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n} \quad (1)$$

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (2)$$

$$a = A/N \quad (3)$$

$$d = 2 \times \sqrt{a/\pi} \quad (4)$$

式中: N_i 为试件第 i 层断面的空隙数量; n 为试件的扫描断面总层数, 本试验取值为 25; A_i 为试件第 i 层断面的空隙总面积.

2D 断面图像特征参数分为 2 类, 一类是空隙数量; 一类是表征空隙大小的参数, 包括平均单个空隙面积和平均单个空隙的等效直径. 表 4 所示为统计和计算得到的不同级配的多孔沥青混合料的 2D 断面图像细观空隙特征, 由体积法实测空隙率、2D 断面图像空隙率和 3D 重构空隙率数据可以看出, 根据试件 CT 图像计算和重构得到的试件空隙率与采用体积法实测空隙率数值相近.

表 4 多孔沥青混合料细观空隙特征

Tab.4 Voids characteristics parameters of cross-sections images of porous asphalt concrete

混合料	空隙率/%			断面平均 空隙数量/个	断面平均空隙 总面积/mm ²	平均单个空隙 面积/mm ²	空隙等效 直径/mm
	体积法实测	2D 断面图像	3D 重构				
PAC-13a	16.1	16.0	15.7	88.7	1 290.5	14.5	4.3
PAC-13b	18.2	18.0	17.9	86.3	1 455.0	16.9	4.6
PAC-13c	20.1	19.9	20.4	84.5	1 612.9	19.1	4.9
PAC-13d	22.7	22.8	22.9	83.4	1 852.8	22.2	5.3
PAC-13e	25.1	25.0	24.7	82.2	2 026.8	24.7	5.6
PAC-13c+	20.3	20.0	20.6	73.0	1 618.9	22.2	5.3
PAC-13c-	19.7	19.7	19.9	108.6	1 591.9	14.7	4.3
PAC-10	20.1	20.1	20.2	136.6	1 628.7	11.9	3.9

2.2 2D 断面图像分形特征

2D 断面图像特征参数只描述了多孔沥青混合料空隙的平均大小和数量, 并没有反映空隙的分布特征与构造复杂度. 由于多孔沥青混合料中的空隙结构具有典型的分形特征, 因此根据分形理论计算多孔沥青混合料 CT 断面图像的分形维数, 并采用计盒维数 D_B (box-counting dimension) 描述多孔沥青混合料断面图像, 其物理意义在于, D_B 越大表明断面图像空隙结构越复杂. 图 6 所示为计算得到的多孔沥青混合料试件 2D 断面图像 D_B . 值得说明的是, D_B 是基于图像的像素计算分析得到的, 因而其计算结果大小同获取的 CT 断面图像精度密切相关. 本文中采用了统一的 CT 扫描参数获取了相同精度的试件断面图像, 试验结果具有可比性.

2.3 3D 空隙体积特征参数

多孔沥青混合料的空隙大部分是连通空隙, 在采用 3D 体积数据分析时, 是将连通空隙作为一个空隙体积进行统计和计算的, 而目前还没有合适的方法将大的连通空隙细分为若干个相对独立的空隙进行分析.

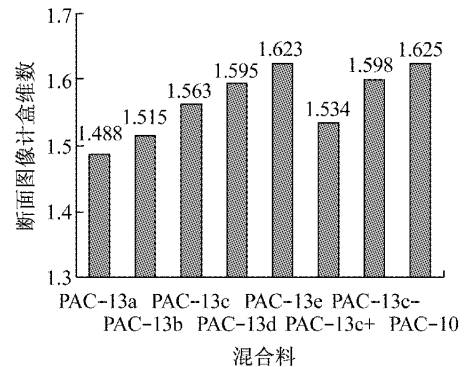


图 6 多孔沥青混合料断面图像计盒维数

Fig.6 Box-counting dimension of porous asphalt concrete's cross sections images

当采用软件 3D 重构试件空隙率时, 各层图像之间的空隙体积是根据一定的算法拟合得到的, 其计算精度同重构采用的图像数量和重构采用的算法密切相关; 而采用 2D 断面图像计算得到的空隙率避免了对各层图像之间的空隙大小的预估, 由表 4 可以看出, 与 3D 重构空隙率比较, 2D 断面图像空隙率更接近试验值, 因此, 本文中未采用 3D 空隙体积分析数据表征混合料的细观空隙.

3 细观空隙特征的影响因素

3.1 空隙率

图 7 所示为多孔沥青混合料(PAC-13a, PAC-13b, PAC-13c, PAC-13d, PAC-13e)体积法实测空隙率同空隙等效直径和断面平均空隙数量的关系曲线,图中 x 为体积法实测空隙率,%, y 为空隙等效直径,mm, z 为断面平均空隙数量,个, R^2 为相关系数.可以看出,随着空隙率的增大,断面平均空隙数量随之减小,而空隙等效直径逐渐增大.图 8 所示为多孔沥青混合料(PAC-13a, PAC-13b, PAC-13c, PAC-13d, PAC-13e)体积法实测空隙率同 2D 断面图像 D_B 的关系. D_B 随空隙率的增大而增大.即随着空隙率的增大,试件断面图像的空隙结构也变得越复杂.

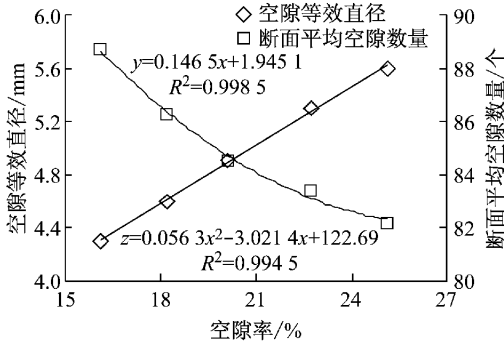


图 7 空隙等效直径、断面平均空隙数量与体积法实测空隙率的关系

Fig. 7 Relationship between void equivalent diameter, number of air voids on cross-section and air voids

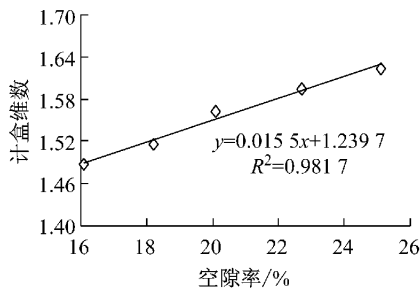


图 8 计盒维数与体积法实测空隙率的关系

Fig. 8 Relationship between D_B and air voids

3.2 级配

为确定级配对多孔沥青混合料细观空隙特征的影响,选取了空隙率均为 20%左右而级配粗细不同的混合料(PAC-13c+, PAC-13c, PAC-13c-, 对应的空隙率分别为 20.3%, 20.1%和 19.7%)进行分析.由图 9 可见,空隙率相近时,混合料级配越粗,则

空隙等效直径越大,断面平均空隙数量越少.

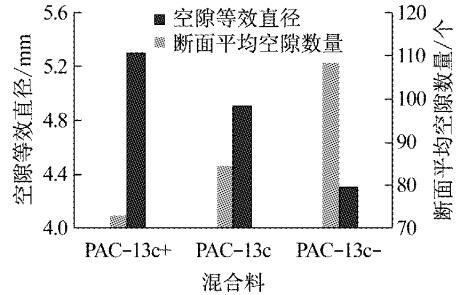


图 9 空隙率相近级配不同时混合料的空隙等效直径和断面平均空隙数量

Fig. 9 Void equivalent diameter and number of air voids on cross-section of porous asphalt concrete with similar air voids and different gradation

由图 10 可见,空隙率相近时,级配越细,则计盒维数越大,混合料空隙复杂度越高.

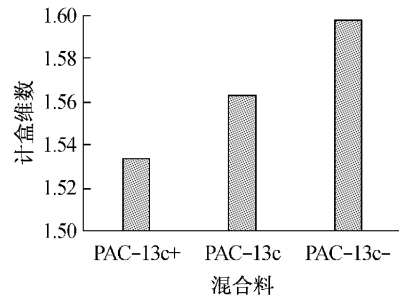


图 10 空隙率相近级配不同时混合料的断面图像计盒维数

Fig. 10 Box-counting dimension of porous asphalt concrete cross sections images with similar air voids and different gradation

3.3 公称粒径

由图 11 可见,公称最大粒径较大的 PAC-13c 空隙等效直径较大、断面平均空隙数量较少.由图 12 可知,公称最大粒径较小的 PAC-10 的 D_B 较大,空隙复杂度较高.

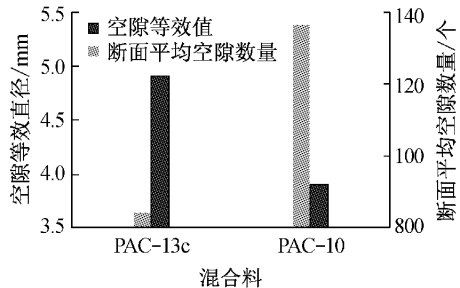


图 11 空隙率相近公称最大粒径不同时混合料的空隙等效直径和断面平均空隙数量

Fig. 11 Void equivalent diameter and number of air voids on cross-section of porous asphalt concrete with similar air voids and different NMAS

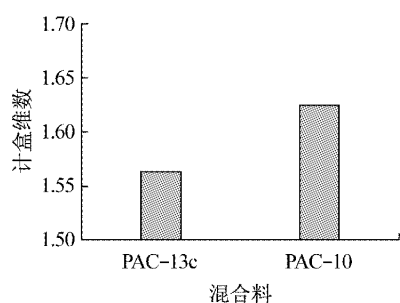


图 12 空隙率相近公称最大粒径不同时混合料的断面图像计盒维数

Fig.12 Box-counting dimension of porous asphalt concrete cross sections images with similar air voids and different NMAS

4 细观空隙特征对混合料的影响

已有的研究表明,多孔沥青混合料的空隙率大小对混合料性能与功能影响显著,影响规律表现为随着空隙率的增大,车辙动稳定度降低,飞散损失增大,马歇尔稳定度减小,降噪效果和透水效果增大。而对空隙率相近的混合料 PAC-13c+, PAC-13c, PAC-13c- 和 PAC-10, 其性能与降噪功能仍存在较大差异。为此,基于混合料细观空隙特征分析造成混合料性能差异的原因。多孔沥青混合料由于其特殊的多孔骨架结构,在荷载的冲击和碾压作用下,容易出现车辙和松散剥落病害,因此有必要研究细观空隙特征对混合料动稳定度和飞散损失的影响。降噪作为多孔沥青混合料的重要功能,细观空隙特征对其影响采用吸声系数进行评价,一般吸声系数峰值越大,降噪效果越明显。

4.1 空隙大小对混合料的影响

采用表征空隙大小的参数——空隙等效直径分析其对多孔沥青混合料性能的影响。由图 13、图 14 可见,随着空隙等效直径增大,混合料的飞散损失和动稳定度随之增大,吸声系数峰值随之减小。表明空

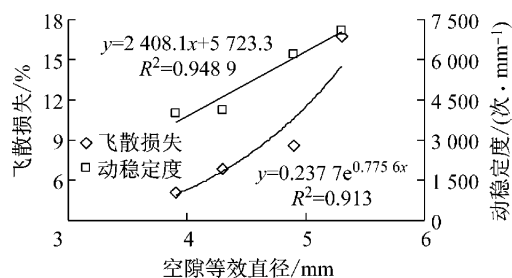


图 13 飞散损失、动稳定度与空隙等效直径的关系

Fig.13 Relationship between Cantabro loss, dynamic stability and void equivalent diameter

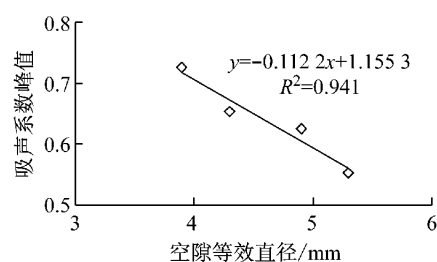


图 14 吸声系数峰值与空隙等效直径的关系

Fig.14 Relationship between acoustic absorption peak and void equivalent diameter

隙率相近的多孔沥青混合料,其高温稳定性、抗飞散特性和降噪效果同细观空隙大小密切相关。

空隙等效直径对混合料性能产生显著影响的原因在于,试件断面图像的细观的空隙大小是混合料宏观级配和组成的反映,在空隙率保持相近时,空隙等效直径越大表明混合料级配越粗或者公称粒径越大,偏粗的级配和较大的公称粒径能够为混合料提供更好的嵌挤力,相应提高了混合料的高温抗车辙和高温抗剪强度;同时,偏粗的级配和较大的公称粒径能使得混合料在飞散试验中受到的冲击力集中于局部某一处集料颗粒的可能性增大,从而造成试件试验中的飞散损失较大。

空隙等效直径对吸声系数和降噪效果产生影响的原因在于,在空隙率相同的条件下,空隙等效直径越小,则空隙数量增多,相当于混合料中的空隙通道孔径小且路径复杂,当声波进入空隙后,声波发生多次碰撞的可能性大大增加,空隙壁的摩擦及空气黏滞阻力等使相当一部分声能转化为热能而被耗散,因此吸声系数或降噪效果较好。

4.2 空隙数量对混合料的影响

当混合料空隙率相近时,试件断面图像空隙总面积值相近,此时平均空隙数量与空隙等效直径之间呈反比关系,如图 15 所示。因此,飞散损失和动稳定度随断面平均空隙数量的增大而减小,吸声系数峰值随断面平均空隙数量的增加而增大,如图 16 和 17 所示。

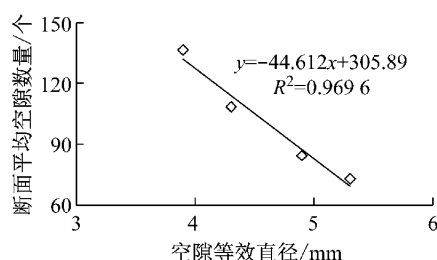


图 15 断面平均空隙数量与空隙等效直径的关系

Fig.15 Relationship between number of air voids on cross-section and void equivalent diameter

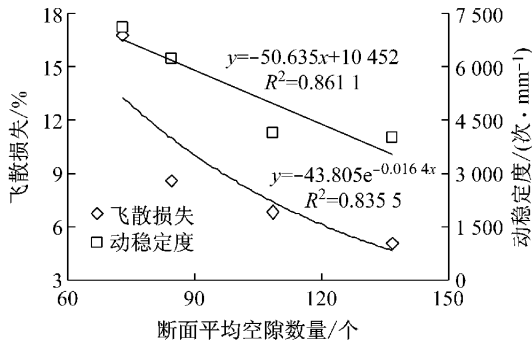


图 16 飞散损失、动稳定度与断面平均空隙数量的关系

Fig. 16 Relationship between Cantabro loss, dynamic stability and number of air voids on cross-section

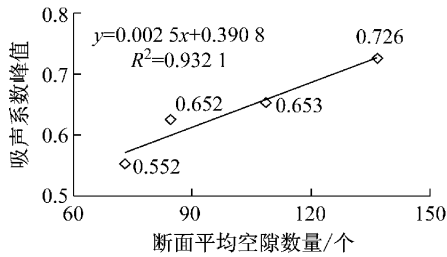


图 17 吸声系数峰值与断面平均空隙数量的关系

Fig. 17 Relationship between acoustic absorption peak and number of air voids on cross-section

4.3 分形维数对混合料的影响

图 18 和图 19 所示分别为混合料飞散损失、动稳定度和吸声系数峰值与分形维数之间的关系。可以看出,随着分形维数的增大,多孔沥青混合料抵抗飞散的能力和降噪效果增加,高温抗车辙性能降低。

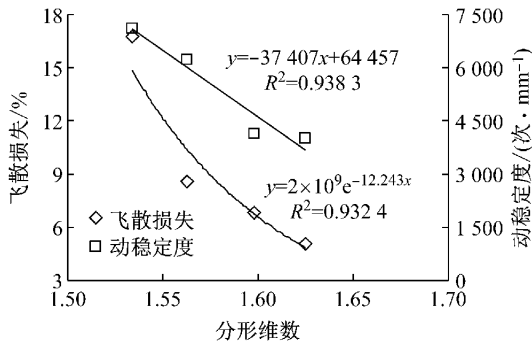


图 18 飞散损失、动稳定度与分形维数的关系

Fig. 18 Relationship between Cantabro loss, dynamic stability and fractal dimension

分形维数反映了混合料断面图像空隙结构的复杂程度,随着试件断面空隙图像分形维数的增大,动稳定度呈下降趋势。试件断面空隙图像分形维数越大,表明混合料中空隙通道越复杂,当声波进入空隙后,孔隙中的空气随之振动,与空隙壁的摩擦及由于

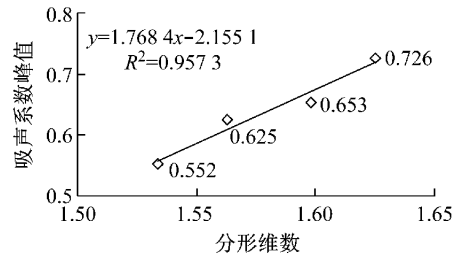


图 19 吸声系数峰值与分形维数的关系

Fig. 19 Relationship between acoustic absorption peak and fractal dimension

空气黏滞阻力等耗散的声能越多,因此吸声系数或降噪效果较好。

综上所述表明,对于多孔沥青混合料,当其空隙率相近时,其性能与降噪功能的变化规律同混合料的细观空隙特征密切相关。根据已有的多孔材料研究结果和上述分析可以推断,除了构成骨架结构的沥青混合料自身的材料性能之外,空隙的大小、形貌、空隙分布和均匀性对混合料的力学强度和整体性能产生显著的影响,从而导致这些细观空隙特征的变化不但造成多孔沥青混合料路用性能的差异,也影响了混合料的功能。

多孔沥青混合料的性能和功能间也存在矛盾,例如降噪效果和高温性能。因此混合料设计时,在保证基本性能的前提下,可以根据特定功能和要求优化设计,例如混合料目标空隙率控制在 20% 时,当路面对降噪要求较高时,可以在混合料设计中通过采用 10 mm 的公称最大粒径、细化级配等措施控制混合料的等效空隙直径在 4 mm 左右;当对高温稳定性要求较高时,通过采用偏粗的级配和 13 mm 的公称最大粒径使混合料的等效空隙直径达到 5 mm 左右。当混合料的等效空隙直径控制在 4.5 mm 左右时,混合料的性能与功能则相对均衡。

5 结论

(1) 材料组成宏观上的差异导致多孔沥青混合料的细观空隙特征变化,进而影响混合料的路用性能和功能。多孔沥青混合料试件断面 2D 图像中的空隙等效直径、空隙面积、空隙数量、空隙分形特征同混合料的材料组成与性能密切相关,可以用于表征多孔沥青混合料的细观空隙特征参数。空隙的分形特征可采用计盒维数表示,计盒维数越大,表明空隙结构越复杂。

(2) 随着多孔沥青混合料空隙率的增大,试件断面图像的平均空隙数量减小,而空隙等效直径增

大,断面空隙图像的计盒维数增大;空隙率相近的多孔沥青混合料,级配越粗,空隙等效直径越大,断面平均空隙数量越少,计盒维数越小;相对于 PAC-13c,公称最大粒径较小的 PAC-10,空隙等效直径较小,断面平均空隙数量较多,计盒维数较大。

(3) 空隙率相近的多孔沥青混合料,随着空隙等效直径增大或断面平均空隙数量的减小,混合料的高温抗车辙稳定性增强,抗飞散性能和降噪效果降低;随着试件断面空隙图像分形维数的增大,多孔沥青混合料抵抗飞散的能力和降噪效果增加,高温抗车辙性能降低。

(4) 空隙率对多孔沥青混合料的路用性能和功能产生影响。而对于空隙率相近材料组成不同的多孔沥青混合料,路用性能和降噪功能仍存在显著差异;从宏观角度看,其原因在于级配粗细和公称最大粒径的变化,从细观角度看,多孔沥青混合料空隙等效直径的变化则是影响多孔沥青混合料路用性能和功能的重要因素。

参考文献:

- [1] Abbott C L, Comino-Mateos L. In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system [J]. *Water and Environment Journal*, 2003, 17(3):187.
- [2] 蒋玮,沙爱民,肖晶晶,等.透水沥青路面的储水-渗透模型与效能[J]. *同济大学学报:自然科学版*, 2012, 41(1):72.
JIANG Wei, SHA Aimin, XIAO Jingjing, *et al.* Water storage-infiltration model for permeable asphalt pavement and its efficiency [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2012, 41(1):72.
- [3] Masad E, Muhunthan B, Shashidhar N, *et al.* Internal structure characterization of asphalt concrete using image analysis[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 1999, 13(2):88.
- [4] 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部特性[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2012, 43(6):2343.
WU Wenliang, WANG Duanyi, ZHANG Xiaoning, *et al.* Air voids distribution of asphalt mixtures based on industrial computerized tomography [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2012, 43(6):2343.
- [5] Razavi M R. Characterization of microstructure and internal displacement field of sand using X-ray computed tomography [D]. Washington D C; Washington State University, 2006.
- [6] 张肖宁,段跃华,李智,等.基于 X-ray CT 的沥青混合料材质分类方法[J]. *华南理工大学学报:自然科学版*, 2011, 39(3):120.
ZHANG Xiaoning, DUAN Yuehua, LI Zhi, *et al.* Classification of asphalt mixture materials based on X-ray computed tomography [J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2011, 39(3):120.
- [7] Masad E, Castelblanco A, Birgisson B. Effects of air void size distribution, pore pressure and bond energy on moisture damage[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2006, 34(1):15.
- [8] 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.
- [9] Zelelew H M, Almutashri A, Agaian S, *et al.* An improved image processing technique for asphalt concrete X-ray CT images[J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2013, 14(2):341.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Alvarez A E, Epps Martin A, Estakhri C. Drainability of permeable friction course mixtures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(6):556.
- [13] 裴建中,张嘉林,常明丰.矿料级配多孔沥青混合料空隙分布特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(1):1.
PEI Jianzhong, ZHANG Jialin, CHANG Mingfeng. Influence of mineral aggregate gradation on air void distribution characteristic of porous asphalt mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(1):1.
- [14] Molenaar A A A, Hagos E T, van de Ven M F C. Effects of aging on the mechanical characteristics of bituminous binders in PAC [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(8):779.
- [15] Alvarez A E, Martin A E, Estakhri C. A review of mix design and evaluation research for permeable friction course mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(3):1159.
- [16] Liu Q Q, Cao D W. Research on material composition and performance of porous asphalt pavement [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2009, 21(4):135.
- [17] Philip H, David A. Epoxy modified open-graded porous asphalt [J]. *Road Materials and Pavement Design*, 2008, 9(3):481.
- [18] Alvarez A E, Epps-Martin A, Estakhri C, *et al.* Evaluation of durability tests for permeable friction course mixtures [J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2010, 11(1):49.