

# Analysis of the Void Structure Characteristics Affected by Coarse Aggregate in Asphalt Concrete

Weigang Sun<sup>1,2</sup>, Lun Ji<sup>2</sup>, Lei Zhang<sup>3</sup>, Jun Li<sup>2</sup>, Haiquan Liu<sup>2</sup>, Wendong He<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Heilongjiang Bada Road & Bridge Construction Co., Ltd., Harbin Heilongjiang

<sup>2</sup>School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang

<sup>3</sup>China Road & Bridge Co., Ltd., Beijing

<sup>4</sup>Shanxi Transportation Research Institute, Taiyuan Shanxi

Email: jilunhit@126.com

Received: Mar. 8<sup>th</sup>, 2018; accepted: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2018; published: Mar. 29<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

Porosity and performance of asphalt mixture are closely related to the microstructure of the gap which directly affects the various properties of asphalt mixture. For the coarse aggregate, the design of different gradation and needle-like content of the mixture, through CT scanning, digital image acquisition technology research, obtained three-dimensional reconstruction diagram. Using VG Studio MAX2.2, it sets a different gray range, and then extracts the gap. The voids of the asphalt mixture were analyzed, and the evaluation index of the void structure was analyzed, after that, the void structure was studied. It is found that the void dates obtained by this method are consistent with standard test. The pore size distribution is affected by the coarse aggregate gradation and the needle sheet content. The asphalt mixture is calculated by setting the gray threshold method Porosity; the result is greater than the measured porosity; the area ratio parameter Q, can accurately characterize the asphalt mixture in the coarse aggregate and the proportion of the gap.

## Keywords

Asphalt Mixture, Coarse Aggregate, Digital Image Acquisition, Void Structure, Grading, Needle-Like

## 粗集料对沥青混合料空隙结构影响分析

孙维刚<sup>1,2</sup>, 纪伦<sup>2</sup>, 张磊<sup>3</sup>, 李俊<sup>2</sup>, 刘海权<sup>2</sup>, 贺文栋<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>黑龙江省八达路桥建设有限公司, 黑龙江 哈尔滨

<sup>2</sup>哈尔滨工业大学交通科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨

<sup>3</sup>中国路桥工程有限责任公司, 北京

<sup>4</sup>山西省交通科学研究院, 山西 太原

Email: jilunhit@126.com

收稿日期: 2018年3月8日; 录用日期: 2018年3月22日; 发布日期: 2018年3月29日

## 摘要

沥青混合料的空隙率与性能密切相关, 空隙细观结构直接影响着沥青混合料的各种性能。针对粗集料, 设计不同级配和针片状含量的混合料, 通过CT扫描、数字图像获取技术方法的研究, 获得三维重构图, 采用VG Studio MAX2.2设定不同灰度范围, 进而提取空隙, 构建沥青混合料的空隙空间变化特征图, 分析空隙结构评价指标, 进而对空隙结构进行研究。通过空隙定性对比发现, 该方法获得的空隙变化同表干法实测规律一致; 空隙粒径分布受粗集料级配和针片状含量影响显著; 通过设定灰度阈值的方法计算沥青混合料空隙率, 其结果大于实测空隙率; 构建的面积比值参数, 能准确地表征沥青混合料中粗集料和空隙的比例关系。

## 关键词

沥青混合料, 粗集料, 数字图像获取, 空隙结构, 级配, 针片状

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

沥青混合料体积参数中, 空隙率与性能相关性显著[1]-[11], 而空隙率作为定量的宏观指标, 其分布特性或结构特征的研究, 将有助于深入理解混合料组成特性。由于空隙结构灰度变化范围很小, 且接近于0, 在断层扫描的图像上能够清楚识别。因此, 可借助工业CT和图像处理技术[12][13]对不同粗集料级配和针片状含量的沥青混合料空隙结构进行定性和定量研究。

## 2. 试验材料

### 2.1. 试验用混合料级配

1) 以AC16中值级配J1为基础, 变换粗集料筛孔通过率形成不同粗细且走向一致的矿料级配类型, 并以此模拟生产过程中粗集料变异导致的级配差异。基本思路是保证各4.75 mm及以下细集料筛孔通过率不变, 在9.5 mm筛孔通过率中值基础上分别增减 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ , 并保证9.5 mm以上各档粗集料之间比例不变, 得到5个不同的AC16级配如表1所示。

2) 为考察4.75 mm通过率对沥青混合料结构和性能的影响, 以AC16级配中值J1级配为基础, 保证除4.75 mm以外的筛孔通过率不变, 在4.75 mm中值筛孔通过率基础上分别 $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 得到JA、JB、JC、JD 4个级配, 即4.75 mm对应的通过率分别为58%、53%、43%和38%。

### 2.2. 试验用矿料的针片状含量设计

以AC16级配中值为基准, 六种材料Z1~Z6, 其粗集料的针片状颗粒含量分别为0%、10%、20%、30%、40%、50%。

**Table 1.** J1 - J5 ore grade with mesh through rate  
**表 1.** J1~J5 矿料级配筛孔通过率

级配编号	通过下列筛孔(方孔筛/mm)的质量百分率/%										
	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
J2	100	96.7	89.3	80	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J3	100	95.8	86.7	75	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J1	100	95	84	70	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J4	100	94.2	81.3	65	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6
J5	100	93.3	78.7	60	48	34	24.5	17.5	12.5	9.5	6

### 2.3. 试验用混合料的沥青用量

以 AC16 级配中值为基础, 确定中值级配沥青混合料的最佳沥青用量, 其它级配变化时均采用中值级配所确定的沥青用量, 级配中值条件下沥青混合料的最佳油量为 4.5%。

## 3. 基于工业 CT 技术的沥青混合料数字图像获取

试验采用德国 Phoenix v|tome|x s 微焦点工业 CT, 扫描电压为 190 Kv, 电流 300  $\mu$ A。对沥青混合料试件进行扫描重构, 获得试件结构图。打开 phoenix datosx2 rec 导入 CT 扫描数据“.pcr”文件→几何校正→定义材料参数→对图像进行滤波处理→进行三维重构得到“.vgi”文件。导入.vgi 数据之后, 在 VG Studio MAX2.2 中沥青混合料试件将能够以 3D 形式显示出来, 并且能够通过电子切割得到任意断面上的二维图像, 如图 1 所示。

采用 CT 成像重构的沥青混合料试件, 不同密度的物质具有不同的灰度阈值, 因此 VG Studio MAX2.2 软件将主要基于灰度识别来进行扫描试件的处理。沥青混合料各组分在的断层图像中将呈现明显的灰度界线, 这为沥青混合料组分分离提供了条件。沥青混合料 CT 扫描二维断面图像见图 2, 由图可以清晰识别沥青混合料不同组分。

## 4. 基于 CT 技术的空隙分布特性分析

成型试件的体积参数如表 2 所示。

按照上述方法对不同的沥青混合料试件进行重构处理, 采用 VG Studio MAX2.2 设定不同灰度范围对空隙进行了提取, 对比了不同影响因素条件下沥青混合料的空隙空间变化特征图如图 3~5 所示, 图中各颜色分别代表了不同体积大小的空隙结构。

图 3 中空隙结构从左至右依次为 JA、JB、J1、JC、JD, 其 4.75 mm 通过率分别为 58%、53%、48%、43%、38%。图像发现, 4.75 mm 筛孔通过率越小, 空隙越小, 与排水法实测的空隙变化规律是一致的。表明在 AC16 沥青混合料中, 4.75~9.5 mm 粒径的集料在 AC16 沥青混合料中主要起到了填充的作用。

由图 4 发现, 粗集料级配的变化会影响 AC16 沥青混合料的空隙变化, J2 和 J3 空隙最大, J1 次之, J4 和 J5 空隙最小, 变化规律与实测相吻合。细集料比例不变, 9.5 以上粗集料同比例的增加减少了沥青混合料的空隙。

图 5 中, 从左至右表示的是 AC16 级配不同的粗集料针片状颗粒含量的 Z1~Z6 混合料空隙分布特征。由图可知, 沥青混合料的空隙随着针片状颗粒含量的增加而显著增加, 与实测结果(表 2)一致。

综合以上各图还直观地发现, 大空隙结构多分布于试件中下部位。这是由于沥青混合料试件旋转压实成型过程中, 与压头接近的部位更容易被压实, 使得空隙结构多出现在试件中下部位。综上可知, 采用 CT 技术定性的对空隙结构进行描述的方法是可行的。

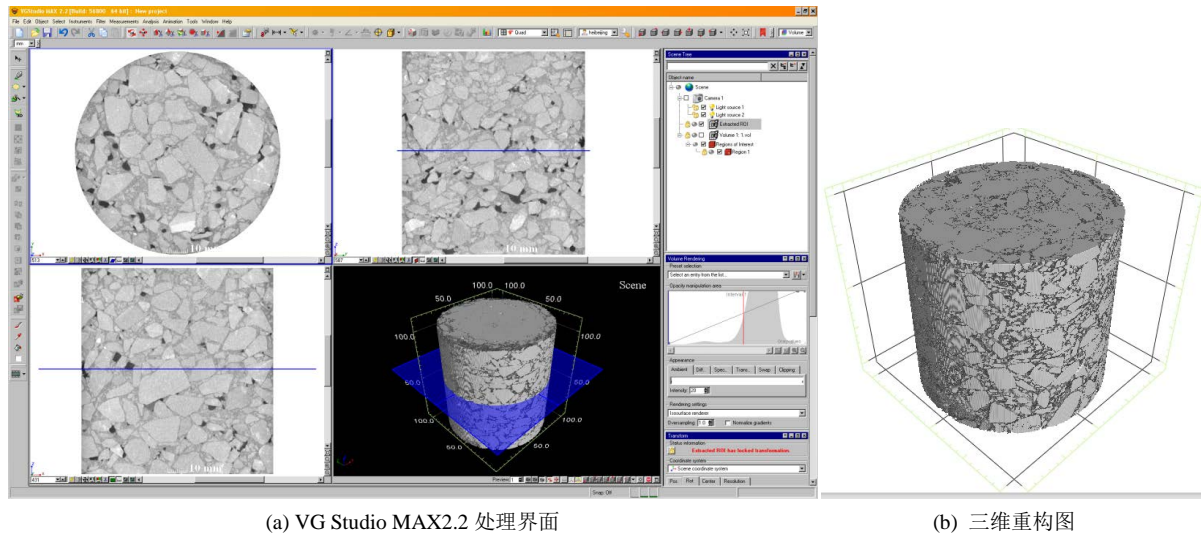


Figure 1. Asphalt mixture diagram  
图 1. 沥青混合料重构图

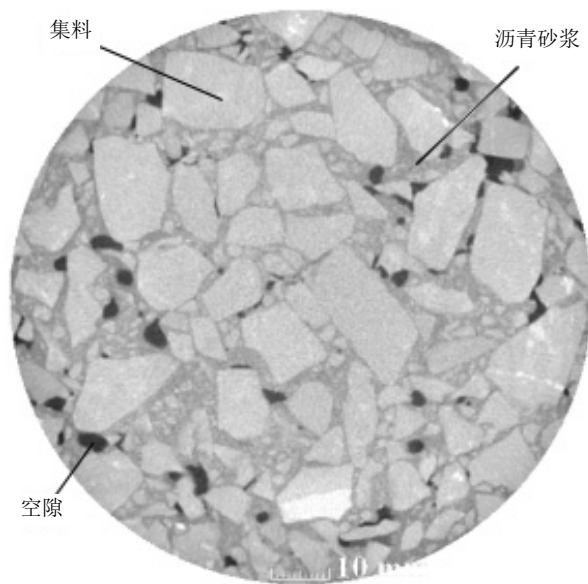


Figure 2. Schematic diagram of asphalt mixture components  
图 2. 沥青混合料各组份示意图

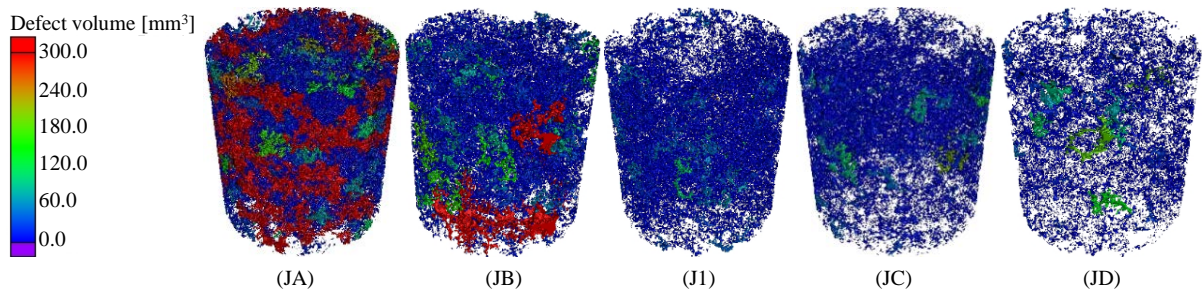


Figure 3. JA~JD~J1 asphalt mixture gap changes  
图 3. JA~JD~J1 沥青混合料空隙变化

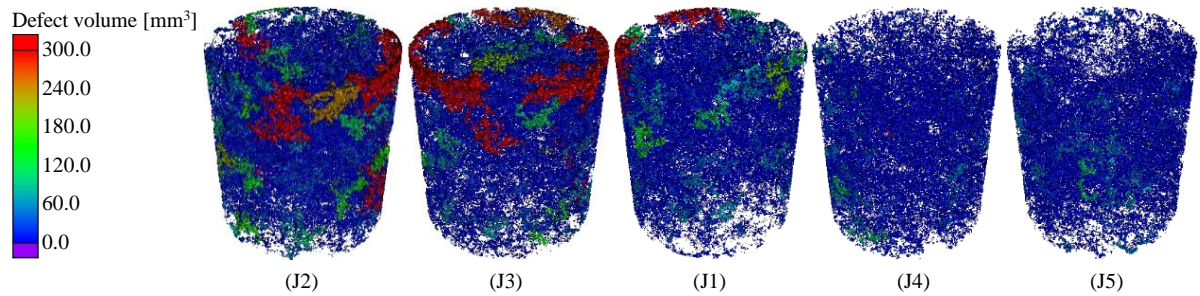


Figure 4. J1 - J5 mixture gap changes  
图 4. J1~J5 混合料空隙变化

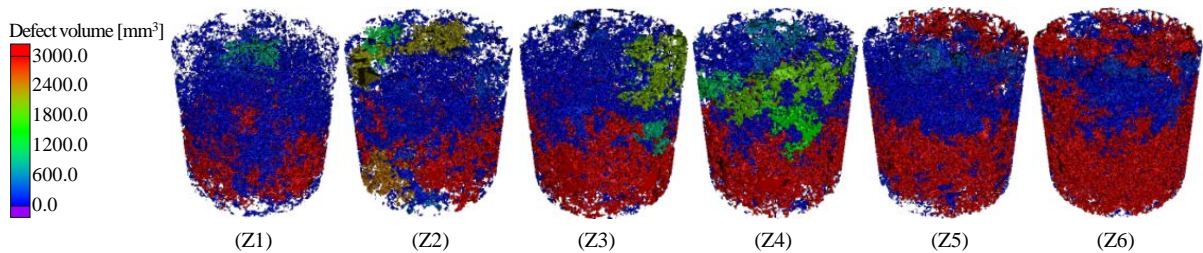


Figure 5. Z1~Z6 needle flaky asphalt mixture gap changes  
图 5. Z1~Z6 含针片状沥青混合料空隙变化

Table 2. AC16 different asphalt mixture volume index  
表 2. AC16 不同沥青混合料体积指标

编号	毛体积密度(g/cm <sup>3</sup> )	空隙率(%)	矿料间隙率(%)	沥青饱和度(%)
J2	2.458	4.64	14.74	68.52
J3	2.459	4.61	14.73	68.69
J1	2.462	4.48	14.63	69.35
J4	2.486	3.57	13.82	74.19
J5	2.492	3.34	13.63	75.50
JA	2.422	6.12	16.27	62.38
JB	2.450	4.98	15.16	67.15
J1	2.462	4.48	14.63	69.35
JC	2.495	3.16	13.36	76.34
JD	2.505	2.72	12.88	78.86

### 5. 沥青混合料空隙结构评价指标

上文主要从定性的角度对沥青混合料的空隙分布特性进行了分析，虽然该方法直观清楚，但是还不足以说明不同沥青混合料空隙结构之间的本质差异，因此，有必要进一步提取沥青混合料的量化指标，定量的对空隙结构进行分析。本文对采用的空隙结构评价指标介绍如下。

#### 1) 空隙平均费雷特(feret)直径

将沥青混合料横断面空隙结构提取得到如图 6 所示。由图可知，空隙结构由很多大小不一的空隙颗粒组成，对于 SMA 来说，空隙颗粒粒径较大且个数较少，AC 沥青混合料空隙则是粒径较小且数目较多。

为了研究不同的粗集料级配及针片状含量对沥青混合料空隙粒径组成的影响，以空隙的平均费雷特

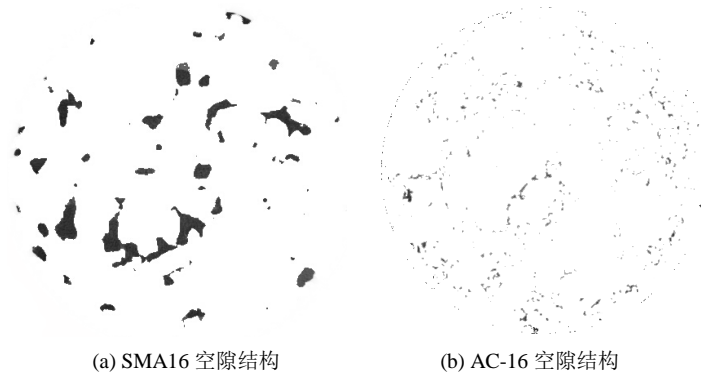


Figure 6. Clearance two-dimensional cross-sectional structure  
图 6. 空隙二维断面结构图

(feret)直径为指标来进行空隙粒径分布定量分析。平均费雷特(feret)直径定义为：经过颗粒的中心，任意方向的直径称为一个费雷特直径。每隔  $10^\circ$  方向求取一个费雷特直径长度，再将这 36 个费雷特直径求平均值即得到平均费雷特(feret)直径。

在每个沥青混合料试件中沿纵向每隔 1 cm 挑选一张 CT 断层图片，通过图像处理得到每张图片中所有空隙的平均费雷特直径。将其按直径大小分级统计累计空隙颗粒个数。再对多张断层图片求取不同粒径范围内的颗粒个数均值，得到各混合料试件的空隙粒径分布。

#### 2) 空隙轮廓分形维数

每个独立空隙的轮廓均是由不规则的曲线构成，为了定量描述空隙的轮廓特性，故采用分形维数对空隙的轮廓进行评价。采用 IPP 具体测量空隙分形维数，测量采用变尺码法。

#### 3) 扫描空隙率

基于 CT 扫描技术可以得到沥青混合料的全局结构参数，因此可以采用 VG Studio MAX2.2 通过设定不同灰度阈值将空隙结构分离，计算获得空隙结构的体积，进一步计算沥青混合料的实体体积，二者的比值就是试件的空隙率。按此方法测定的空隙率本文称之为“扫描空隙率”，相应的将排水法测定的空隙率称之为实测空隙率。

#### 4) 空隙面积比

由于沥青混合料的性能不仅受粗集料的影响，同时还受空隙的影响。因此本节用集料面积和空隙面积的比值共同构建空隙面积参数如式(1)所示：

$$Q = \frac{Area_{jiliao}}{Area_{kongxi}} \quad (1)$$

式中  $Area_{jiliao}$  ——粗集料颗粒横断面积( $\text{cm}^2$ )；

$Area_{kongxi}$  ——空隙横断面积( $\text{cm}^2$ )。

集料区域、空隙区域如图 7 所示。

## 6. 粗集料对沥青混合料空隙结构影响分析

### 6.1. AC16 粗集料级配变化对沥青混合料空隙结构影响分析

AC16 粗集料级配变化沥青混合料空隙结构指标统计见图 8。

由图 8(a)可知，AC16 级配 J1~J5 中，细集料比例不变，随着不同粒径粗集料比例的变化，空隙平均直径的变化特征是当空隙平均直径小于 0.6 mm 时，J5、J4 和 J3 的空隙个数显著大于 J2 和 J3，平均直径

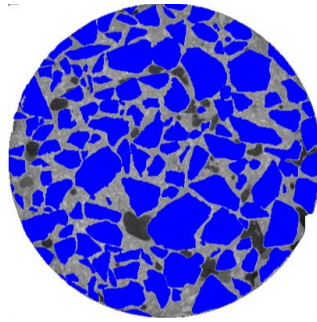
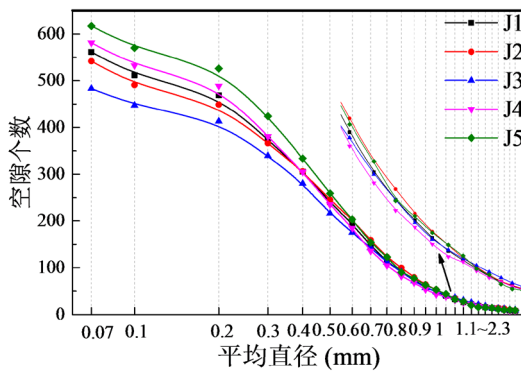
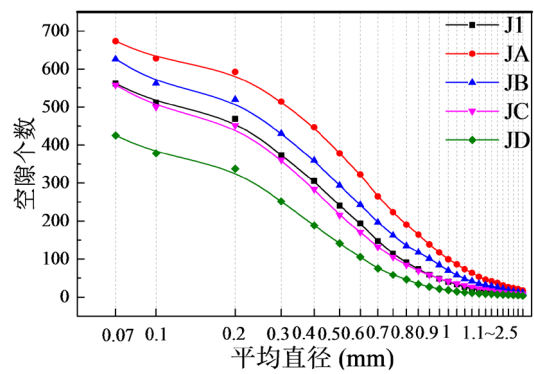


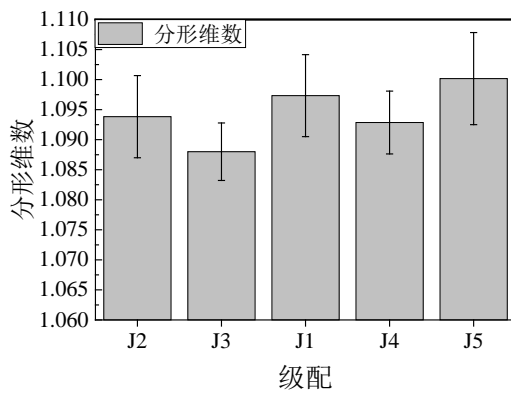
Figure 7. Aggregate and void area demonstration diagram  
图 7. 集料与空隙区域示范图



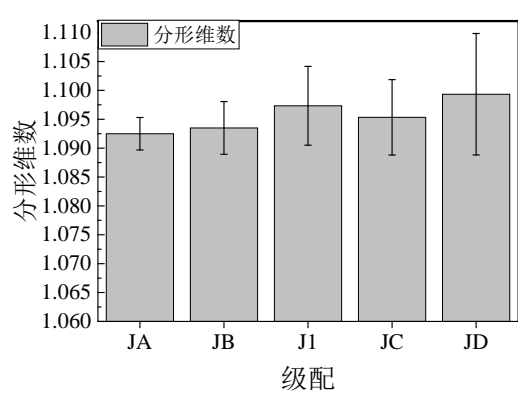
(a) J1~J5 空隙粒径分布



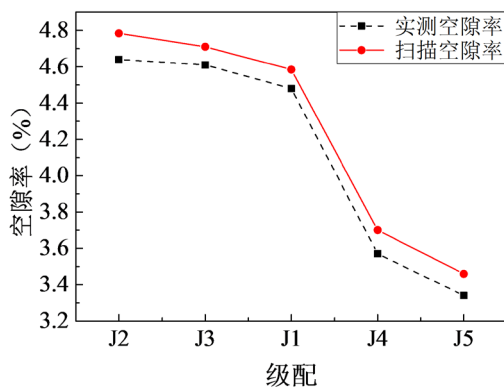
(b) JA~JD~J1 空隙粒径分布



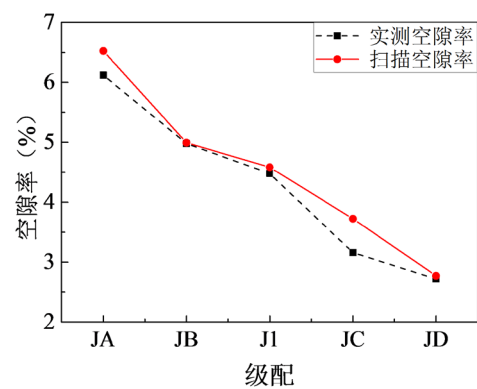
(c) J1~J5 空隙轮廓分维



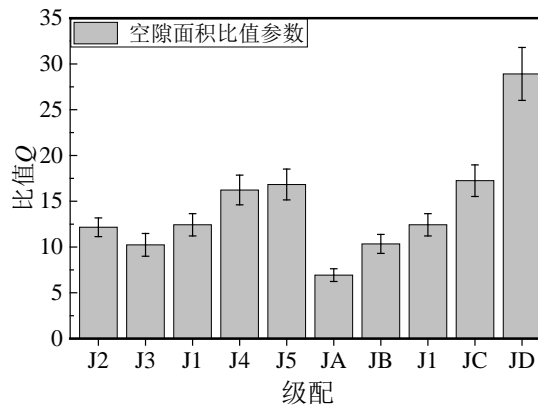
(d) JA~JD~J1 空隙轮廓分维



(e) J1~J5 空隙率对比



(f) JA~JD~J1 空隙率对比



(g) 空隙面积参数

Figure 8. AC16 gap structure indicators

图 8. AC16 空隙结构指标

大于约 0.6 mm 时, J2、J3 空隙个数大于 J3、J4 和 J5。说明细集料不变, 随着 9.5~19 mm 粗集料的增加, 小空隙逐渐增多, 大空隙逐渐减小。

由图 8(b)可知, AC16 不同 4.75 mm 通过率沥青混合料 JA~J1~JD 中, 随着 4.75 mm 通过率的减小, 沥青混合料中的空隙个数显著增多。无论是大空隙还是小空隙, 都随着 4.75 mm 通过率的减小而减小。

AC16 级配沥青混合料空隙分形维数见图 8(c)和图 8(d), 显著性及相关性检验见表 3。

空隙轮廓分形维数受级配因素影响方差检验不显著, 但是随大颗粒粗集料的增加整体上呈现正相关趋势。JA~JD~J1 中, 空隙分形维数受 4.75 mm 通过率的影响方差检验不显著, 但相关检验发现随着 4.75 mm 通过率的减小其分形维数逐渐增加, 具有明显的线性正相关趋势。

由图 8(e)和图 8(f)可知, 扫描空隙率随级配的变化趋势和实测空隙率变化是一致的。工业 CT 扫描计算的空隙率高于实测空隙率, 造成这种现象的原因是由于实测过程中沥青混合料试件表面具有较多的开口孔隙, 在测定表干重的时候水流走而不能充满孔隙。由此造成表干重测量值偏小, 进一步使得沥青混合料的空隙率测量值减小。随着开口孔隙的逐渐增大, 水分流失逐渐增加, 由此造成的误差也越来越大。

由图 8(g)可知, 在 J1~J5 级配中, 面积参数随着 9.5~19 mm 颗粒的增加逐渐增加。JA~JD 和 J1 中, 值随着 4.75 mm 通过率的降低呈现显著上升相对于 J1~J5 级配来说此种现象更加明显。

## 6.2. 针片状含量对沥青混合料空隙结构影响分析

不同粗集料针片状含量的沥青混合料空隙结构指标统计见图 9。

由图 9(a)所示, Z1~Z6 中, 当针片状颗粒含量较小时, 沥青混合料中平均直径较小的空隙占据优势。随着粗集料针片状含量的增加, 平均直径大的空隙个数逐渐增多。可见针片状颗粒含量的增加会使得空隙结构逐渐增大。

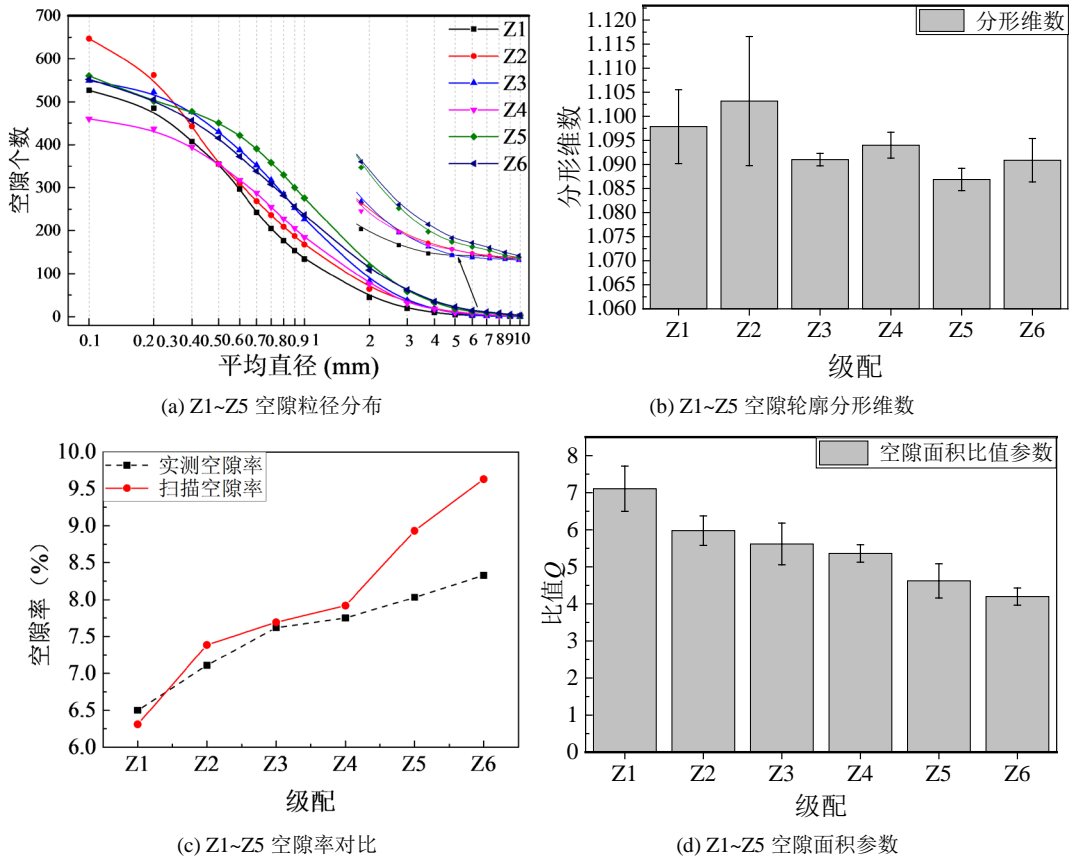
不同针片状含量沥青混合料分形维数见图 9(b), 显著性及相关性检验见表 4。

结果表明, Z1~Z6 中, 随着针片状颗粒的增加、空隙的增加空隙分形维数整体上逐渐减少, Pearson 相关系数为-0.445, 呈现显著负线性相关趋势, 但方差检验不够显著。

由图 9(c)可知, 不同针片状含量沥青混合料空隙率变化特征同前文一致, 即扫描空隙率显著大于实测空隙率。同时随着空隙的增加, 这种差异更加明显。

粗集料横断面积和空隙面积的比值见图 9(d), 对比级配 Z1~Z6 发现, 沥青混合料的面积参数值随着针片状的增加出现显著下降。





**Figure 9.** Different needle-like content of asphalt mixture gap structure index  
**图 9.** 不同针片状含量沥青混合料空隙结构指标

**Table 3.** AC16 gap contour fractal dimension significance and correlation test  
**表 3.** AC16 空隙轮廓分形维数显著性及相关性检验

级配类型	方差分析		Pearson 相关性检验			Spearman 相关性检验		
	<i>F</i>	临界值(0.05)	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>Level</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>Level</i>
J1~J5	1.953	2.390	0.352	0.038	0.05	0.341	0.045	0.05
JA~JD-J1	0.962	2.525	0.325	0.056	0.10	0.399	0.018	0.05

**Table 4.** Gap contour fractal dimension significance and correlation test  
**表 4.** 空隙轮廓分形维数显著性及相关性检验

级配类型	方差分析		Pearson 相关性检验			Spearman 相关性检验		
	<i>F</i>	临界值(0.05)	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>Level</i>	<i>R</i>	<i>P</i>	<i>Level</i>
Z1~Z6	1.435	1.980	-0.445	0.001	0.01	-0.517	0.000	0.01

### 7. 结论

基于工业 CT 断层扫描技术开展了沥青混合料多层二维断面图像随粗集料颗粒级配与针片状含量变化的研究，从而分析其对沥青混合料空隙结构的影响，具体所获成果如下：

- 1) 采用 VG Studio MAX2.2 颜色标尺对空隙进行了定性的对比研究，发现空隙变化特点同表干法一致。

2) 采用平均费雷特(feret)直径表征了空隙颗粒的粒径, 通过对不同沥青混合料的横断面空隙粒径进行了统计分析发现, 空隙粒径分布受粗集料级配和针片状含量影响显著。

3) 多数沥青混合料空隙轮廓分形维数受粗集料级配和针片状含量影响不显著, 但是却随粗集料级配和针片状的变化呈现线性相关趋势。

4) 同时通过设定灰度阈值进行了沥青混合料空隙率的计算, 结果表明扫描空隙率大于实测空隙率。

5) 以粗颗粒面积和空隙面积的比值构建了面积比值参数, 该参数能清楚表征沥青混合料中粗集料和空隙的比例关系。

## 参考文献

- [1] 钟昆志, 罗蓉, 樊向阳, 等. 空隙率对砾石沥青混合料浸水抗车辙性能的影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(6): 1083-1087.
- [2] 张长弓. 空隙率与连通空隙率对沥青混合料性能的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2016.
- [3] 王雪冬, 关彦斌. 基于图像技术的大空隙沥青混合料空隙特征与路用性能关系[J]. 北方交通, 2011(5): 47-50.
- [4] 胡苗, 祁锋, 杨红. 空隙率对沥青混凝土性能影响的模型研究[J]. 中外公路, 2010, 30(4): 277-280.
- [5] 彭勇, 孙立军. 空隙率对沥青混合料性能影响[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(5): 826-829.
- [6] 卢亮, 王端宜, 詹小丽. 沥青混合料空隙率与抗车辙性能临界关系研究[J]. 公路, 2008(12): 183-188.
- [7] 季节, 张志新. 基于同种沥青不同级配的大空隙沥青混合料渗水性能试验与评价[J]. 北京建筑工程学院学报, 2006(4): 44-47.
- [8] 李立寒, 曹林涛, 郭亚兵, 等. 初始空隙率对沥青混合料性能影响的试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006(6): 757-760, 789.
- [9] 朱梦良, 王民, 邱鑫贵. 空隙率对沥青混合料性能的影响分析[J]. 长沙交通学院学报, 2005(3): 25-31.
- [10] 包秀宁, 李燕枫, 王哲人. 空隙结构对沥青混合料抗水损害性能的影响[J]. 中南公路工程, 2004(3): 66-67, 71.
- [11] 张登良, 郝培文, 徐涛. 空隙率对沥青混合料技术性能的影响[J]. 石油沥青, 1996(1): 7-12.
- [12] 谭忆秋, 任俊达, 纪伦, 等. 基于 X-ray CT 的沥青混合料空隙测试精度影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(6): 65-71.
- [13] 任俊达. 基于 X-ray CT 沥青混合料细观结构及力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3431, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojtt@hanspub.org](mailto:ojtt@hanspub.org)