

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20231215001

文章编号:1672-9331(2024)01-0012-10

引用格式:徐杰,任东亚,李振,等.基于CT扫描技术的不同压实度下沥青混合料细观空隙特性研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2024,21(1):12-21.

Citation: XU Jie, REN Dongya, LI Zhen, et al. Investigation on mesoscopic pore characteristics in asphalt mixtures under varied compaction levels based on CT technology[J]. J. Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2024, 21(1): 12-21.

基于CT扫描技术的不同压实度下沥青混合料 细观空隙特性研究

徐杰^{1,2},任东亚^{1,2},李振³,李学友^{1,4}

(1.西南交通大学 土木工程学院,四川 成都 610031;2.道路工程四川省重点实验室,四川 成都 610031;3.中国铁路南昌局集团有限公司九江桥工段,江西 九江 332000;4.中铁二局第四工程有限公司,四川 成都 610031)

摘要:【目的】深入了解压实不足对沥青混合料内部空隙细观结构的影响。【方法】以SMA-13试件为对象,通过调整压实次数制备不同压实度的试件。采用计算机断层扫描和图像识别技术精确识别空隙,探究不同压实度下的沥青混合料空隙细观结构特性,包括空隙数量、体积、主轴方向角和配位数。【结果】在沥青混合料成型过程中,受到外部击实功的影响,内部空隙的主轴方向逐渐趋向于稳定状态。此外,随着压实次数的增加,沥青混合料内的大部分空隙逐渐减小,但也存在一些相邻的开口空隙在逐渐结合后形成更大的开口空隙。最终,随着压实程度的提高,空隙的平均配位数减小,导致空隙连通性下降,整体空隙网络的复杂度逐渐减小。【结论】本研究旨在更好地理解不同压实度下沥青混合料空隙结构的细观差异,为沥青混合料的设计、评价和维护提供更为科学的依据。

关键词:道路工程;沥青混合料;压实度;计算机断层扫描技术;空隙空间分布;空隙细观特性

中图分类号:U414

文献标志码:A

Investigation on mesoscopic pore characteristics in asphalt mixtures under varied compaction levels based on CT technology

XU Jie^{1,2}, REN Dongya^{1,2}, LI Zhen³, LI Xueyou^{1,4}

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Key Laboratory of Road Engineering in Sichuan Province, Chengdu 610031, China; 3. Jiujiang Bridge Section, China Railway Nanchang Group Co., Ltd., Jiujiang 332000, China; 4. China Railway Second Bureau Fourth Engineering Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: [Purposes] This study aims to delve into the profound impact of insufficient compaction on the mesoscopic structure of pores within asphalt mixtures. [Methods] The exploration of asphalt mixture pore mesostructural features under different compaction levels includes the analysis of pore quantity, volume, spindle orientation, and coordination numbers. [Findings] Throughout the asphalt mixture formation process, the principal axes of internal voids gradually stabilize under the influence of external compaction forces. Additionally, with an

收稿日期:2023-12-15;修回日期:2023-12-27;接受日期:2023-12-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52378464);四川省科技计划项目(2021YJ0065、2021JDTD0023)

通信作者:李学友(1985—)(ORCID:0009-0005-0631-5155),男,正高级工程师,主要从事路面结构与材料方面的研究。E-mail:253627975@qq.com

increase in compaction cycles, the majority of voids within the asphalt mixture diminish in size. However, some adjacent open voids gradually coalesce, forming larger open voids. Ultimately, as compaction intensity rises, the average coordination number of voids decreases, leading to a reduction in void connectivity and a gradual simplification of the overall void network complexity.

[**Conclusions**] This research endeavors to enhance the comprehension of the mesoscopic variations in pore structures within asphalt mixtures under different compaction levels, offering a more scientifically grounded basis for the design, evaluation, and maintenance of asphalt mixtures.

Key words: road engineering; asphalt mixture; degree of compaction; computer tomography scanning technology; pore spatial distribution; mesoscopic characteristic of pore

Foundation item: Project (52378464) supported by the National Natural Science Foundation of China; Projects (2021YJ0065, 2021JDTD0023) supported by Sichuan Science and Technology Program

Corresponding author: LI Xueyou (1985—)(ORCID:0009-0005-0631-5155), male, senior engineer, primarily engaged in research on pavement structures and materials. E-mail: 253627975@qq.com

0 引言

沥青混合料是一种由沥青、骨料、空隙组成的多孔材料。普遍认为,沥青混合料内部空隙在抵抗主要路面病害(包括车辙、疲劳开裂、低温开裂和水损害)方面起着重要的作用^[1-2]。然而在实际施工中,路面常常出现压实不足的情况,这导致路面实际空隙率大于设计空隙率。而空隙是水流入的通道,水在沥青路面内部的传输和分布是水损害发生的根源,进而导致大量公路在达到设计使用寿命前就出现各种早期病害。

研究者们广泛研究了沥青路面的压实度。LACROIX等^[3]通过改变几何形状和压实方法,获得了不同压实度的试件。DESSOUKY^[4]提出了基于能量理论的压实能量指数,用于评估试件的压实度。LEE等^[5]通过体积特性评估了温拌沥青和聚合物改性沥青的最佳压实温度。LIU等^[6]则从沥青混合料的实际路面性能出发,比较了各种压实方法对混合料内部形貌和断裂行为的影响。上述研究主要聚焦于使用压实指数评估和比较沥青混合料的压实特性,然而,沥青混合料的压实度差异直接影响着内部空隙的细观结构。

近年来,随着计算机算力和成像技术的飞速发展,计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术在研究沥青混合料空隙细观特性方面得到了

广泛应用^[7-10]。ZHANG等^[11]和JIANG等^[12]运用自适应的Otsu方法和卷积神经网络技术,成功实现了对沥青混合料内部空隙结构的精确提取。ZHAO等^[13]利用X射线CT技术对沥青混合料中细观空隙分布进行了研究,发现不均匀的空隙分布会导致沥青混合料的力学性能下降。MAHMUD等^[14]通过虚拟切片技术对空隙的三维图像进行了二维切片和分析,以评估空隙的形态、大小和空间分布等特性。JIANG等^[15]则通过试验研究了多孔沥青混合料的细观空隙特征与性能之间的关系,深入探究了空隙结构参数对性能的影响。这些研究一致表明,沥青混合料内部空隙细观特性对沥青路面的性能、耐久性和寿命具有显著影响。

综上所述,随着科学技术的不断发展,利用高分辨率成像技术对空隙细观结构进行定量化描述变成可能。因此,有必要分析不同压实度下沥青混合料内部空隙的细观特性,以更好地理解空隙结构与性能之间的关系。

本文选取沥青路面上面层常用结构SMA-13作为研究对象,并通过改变试件成型时的击实次数,制作了不同压实度的SMA-13试件。基于CT和图像分析技术,实现沥青混合料内部空隙的精确识别,重点分析不同压实度下沥青混合料内部空隙细观结构差异,量化压实过程中空隙细观结构的演变过程,为后续沥青混合料的设计和评价提供参考。

1 材料与试验

1.1 材料

空隙是路表水分进入并留存于沥青路面结构内部的通道,因此研究沥青路面结构内部空隙特征具有重要意义。本文选取沥青路面上面层常用结构 SMA-13 作为研究对象。考虑到实际施工中普遍存在压实不足的问题,因而实际空隙率一般比设计空隙率更高。与此同时,通过对公路钻芯样品的分析发现,在水损伤的情况下,路面的空隙率通常较高^[16]。因此本文通过改变试件成型时的击实次数,分别制作了目标空隙率为 5.0% 和 7.5% 的 SMA-13 试件。具体而言,本文调整了样品每个面上的压实次数,以实现较低的压实程度。制备了压实次数为 50、40、30、25 和 20 的样品,并在实验室中测量了样品的空隙率。最终,通过 25 次压实制备了一个空隙率接近 7.5% 的样品。为做区分,目标空隙率为 5.0% 和 7.5% 的 SMA-13 试件分别被命名为 SMA-13A 和 SMA-13B。

采用含 4.2% 的 SBS 改性沥青,所有性能指标均符合《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40—2004)^[17] 中 I-D 的规范要求,测试结果列于表 1 中。在样品压实后,按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[18] 中规定的方法进行了实验室空隙率测量。

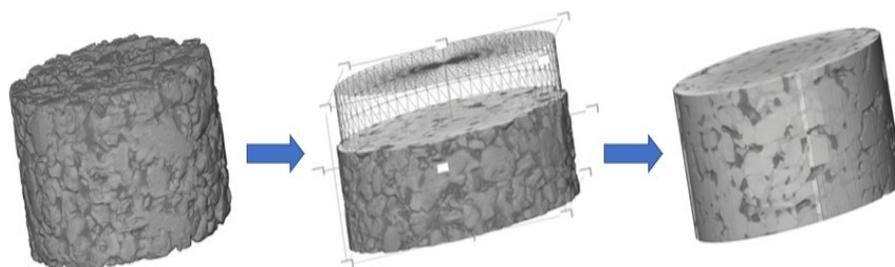


图1 裁剪前后对比图

Fig. 1 Comparison image before and after cropping

1.2.2 空隙提取与分析

图像处理的第二阶段涉及对裁剪后的灰度图像进行分割。在沥青混合料中,空隙的密度显著低于骨料和沥青胶浆的密度,故对应灰度值差异明显。因此,本研究采用阈值分割方法来提取空隙特征。

最初,本研究采用单一阈值进行分割。然而,

表1 SBS改性沥青主要技术规格

Table 1 Key technical specifications of SBS-modified asphalt

试验项目	测试结果
针入度(25 °C, 100 g, 5 s)/(0.1 mm)	42.9
延度(5 cm/min, 5 °C)/cm	33.5
软化点(环球法)/°C	77.8
PG 分级	76~22

1.2 CT 图像处理

1.2.1 图像预处理

CT 试验是一种非破坏性试验,利用不同密度材料对 X 射线吸收不同的特性,进而获得各个强度值不同的采样点,实现对材料内部结构的获取。本文使用 ZEISS Xradia 520 高精度工业 CT 扫描仪进行扫描,扫描电压为 580 kV,扫描电流为 1 mA,获得分辨率为 0.075 mm/像素的灰度图像。

本文采用 Avizo 作为主要分析软件,其是 VSG 公司推出的一款三维图像数据可视化、分析和建模系统,可实现三维图像数据的几何重构和分析。图像处理的第一阶段是裁剪原始灰度图像,水平方向上,考虑到试样外表面开口空隙与外界空气在密度上难以区分,后续分割过程中容易被错误识别为空隙;垂直方向上,X射线的衰减,造成试件上下底面存在影响空隙识别的不清晰部分,故所有模型统一进行裁剪,最后得到半径为 650 个像素、高为 700 个像素的圆柱体分析单元。裁剪前后对比效果展示如图 1。

发现很难找到一个能够清晰分割整个沥青混合料试件的最佳阈值。虽然大多数中间部分被准确分割,但由于 CT 扫描过程中照明的变化和 X 射线衰减,试件两端的部分存在不清晰的边缘分割和自由像素的错误识别。为解决这个问题,本文采用多阈值分割法,针对试件的不同区域使用不同的阈值进行空隙识别,并结合形态学处理技术,精确

提取沥青混合料内部空隙结构。其分割结果如图2所示。

为了更好地分析空隙细观结构特性,通过使用Avizo的“Separate Object”模块将空隙分离出来,该模块是分水岭、距离变换和数值重构算法的高级组合,可以用于计算最佳拟合轮廓的梯度模量。从而将整个大空隙结构分割成无数个彼此相连但不相交的小空隙。然后,使用8色循环色图显示分

离的空隙,以便在相邻的空隙中使用不同的色调进行标记。为了分析分割后的空隙之间的连通情况,采用最大球算法对分割后的空隙进行空隙网络建模,其中,体积较大的球体被定义为孔体,而体积较小且连接相邻孔体的则被称为孔喉。通过这种方式,分割后的空隙被转化为了空隙网络模型(pore network model, PNM)^[19]。本研究中的空隙细观结构处理结果展示在图3中。

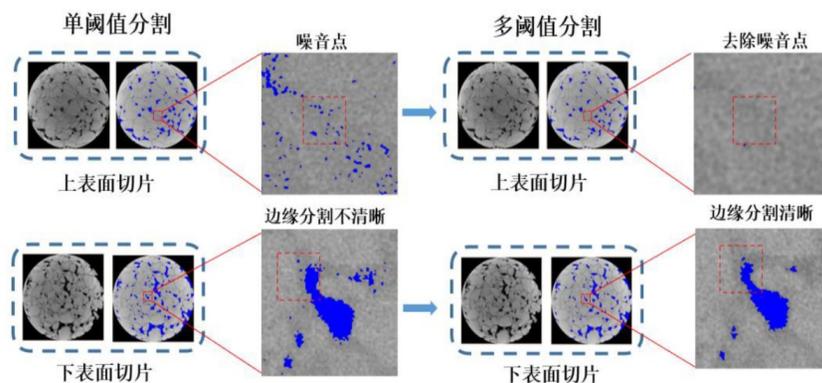


图2 单阈值和多阈值分割结果对比

Fig. 2 Comparison of single-threshold and multi-threshold segmentation results

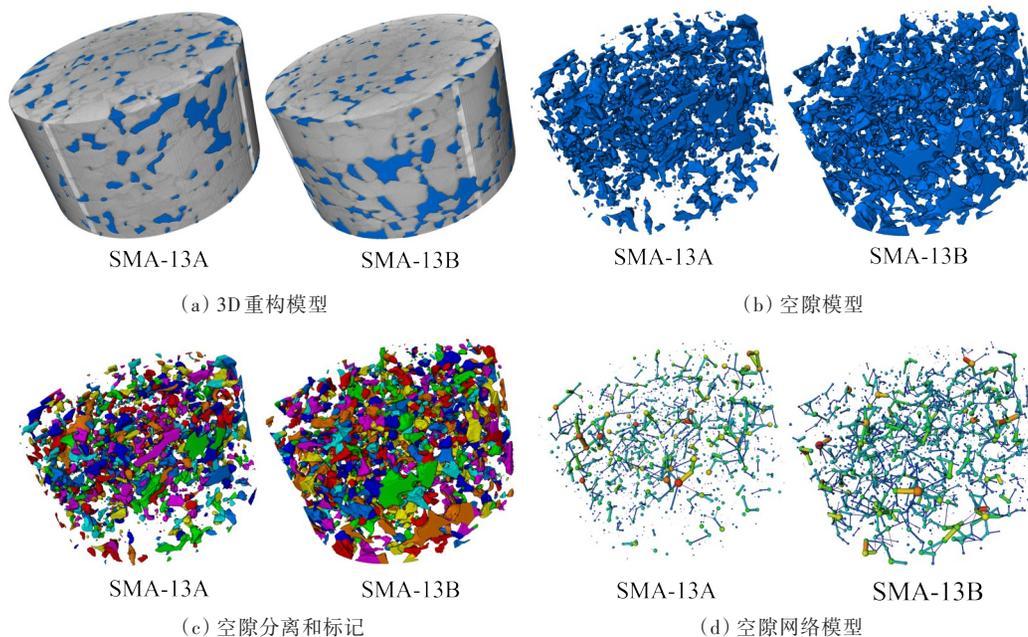


图3 空隙细观结构处理结果

Fig. 3 Pore mesoscopic structure processing results

2 结果与讨论

2.1 空隙率

2.1.1 空隙率大小

通过《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)推荐的常规空隙率测试试验以

及CT扫描技术,可获得表2所示空隙信息,结果汇总如表2。根据表2中数据可知,首先,CT扫描技术与常规试验所测得的内空隙率偏差较小,表明这两种试验方法相互验证了自身的准确性。其次,常规试验所测得的内空隙率均比CT扫描技术得到的大,这可能是由沥青混合料成型时的边缘效应导致的(2.1.2节详述)。

表2 空隙信息表
Table 2 Pore information table

试件	目标空隙率/%	常规试验空隙率/%	CT扫描空隙率/%	空隙总数	空隙总体积/mm ³	平均空隙体积/mm ³
SMA-13A	5.0	5.08	4.57	1 823	17 250.9	9.463
SMA-13B	7.5	7.46	6.95	2 132	26 938.1	12.617

图4显示了两种试件在不同空隙等效直径下的空隙数量及空隙体积占比。从图4可以看出：
1) 两种试件的空隙在不同等效直径下的数量和体积分布规律存在显著的区别，随等效直径的增大，数量越来越少，体积分布先增后减。2) SMA-

13A试件除等效直径在0~1 mm、6~7 mm的区间内空隙比SMA-13B的多以外，其余区间的均比SMA-13B的少。

2.1.2 空隙率分布

水在沥青混合料内的渗流是一个三维过程，没有固定流动方向，因此，除了分析总体空隙率外，更深入地研究空隙在沥青混合料内的空间分布特征具有重要意义。本研究重点分析了试样在沥青混合料垂直和水平方向上的面空隙率分布。

面空隙率是每个切片中空隙面积与切片总面积的比值。图5展示了两种面空隙率的计算方法，图6展示了面空隙率在垂直和水平两个方向上的分布。从图6可以观察到两个主要趋势。首先，在垂直方向上，所有试样的面空隙率分布曲线基本一致，呈现上下大、中间小的“凹面分布”；其次，在水平方向上，面空隙率由外到内逐渐减小。因此，综合考虑垂直和水平两个方向，沥青混合料的空

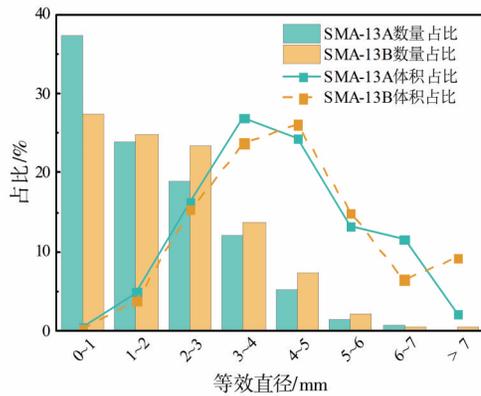


图4 不同等效直径下空隙数量、体积占比
Fig. 4 Pore quantity and volume proportion at different equivalent diameters

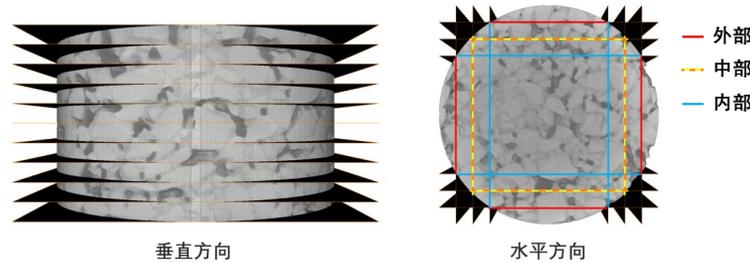


图5 垂直和水平方向上面空隙率计算方法

Fig. 5 Calculation methods of plane porosity in horizontal and vertical directions

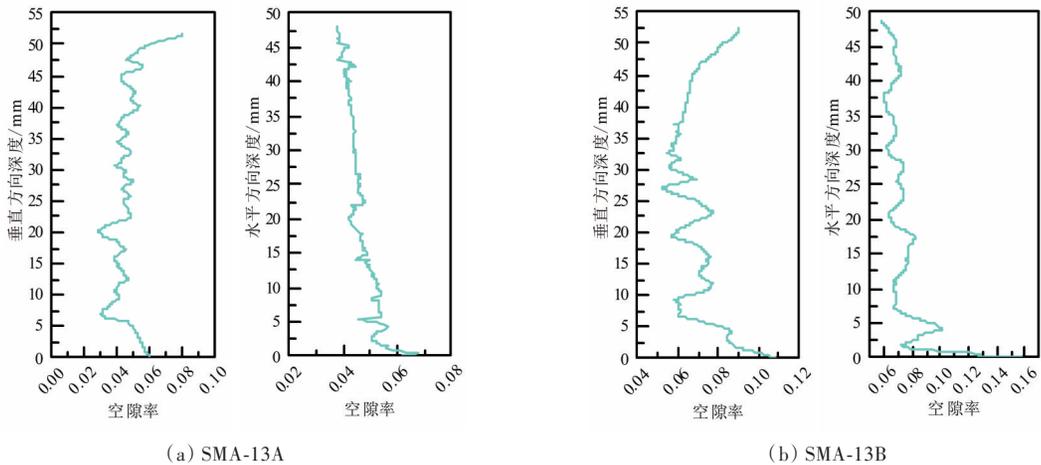


图6 面空隙率分布

Fig. 6 Plane porosity distribution

隙分布呈外大内小逐渐减小的趋势。这一趋势是由马歇尔试件在成型过程中的“边缘效应”引起的,文献[7, 20-21]亦有类似结论。

2.2 空隙数量和体积

2.2.2 空隙数量

图7展示了SMA-13A和SMA-13B两种试件的空隙数量及其占比。数据显示:1) SMA-13A和SMA-13B两种试件闭口空隙都远远多于开口空隙,其中SMA-13A的闭口空隙占比为83.4%,SMA-13B的闭口空隙占比为72.5%。2) 相较于SMA-13B,SMA-13A的总空隙数量明显减少,然而,两者的闭口空隙数量相近,这意味着在进一步压实过程中,SMA-13试件内部减少的空隙主要为开口空隙。

为了更直观地比较两种试件在不同尺寸空隙下的空隙数量占比,本研究引入了空隙等效直径这一概念。空隙等效直径是指在图像处理中,将复杂形状的空隙简化为一个具有相同体积的圆球的直径。图8展示了SMA-13A和SMA-13B在不同等效直径下的空隙数量分布及其累计频率。从图

8可以看出:1) 两种试件的闭口空隙数量皆随等效直径的变大而不断减少,且主要分布在0~4 mm的范围内,此时闭口空隙累计频率超过90%,在等效直径大于5 mm的区间,闭口空隙分布非常少。2) 两种试件的开口空隙分布趋势一致,都是随等效直径的增大呈现先增后减的趋势,并且在2~3 mm的区间达到峰值。3) 两种试件的开口空隙累计频率曲线都在闭口空隙累计频率曲线右侧,表明开口空隙的等效直径普遍比闭口空隙的大。

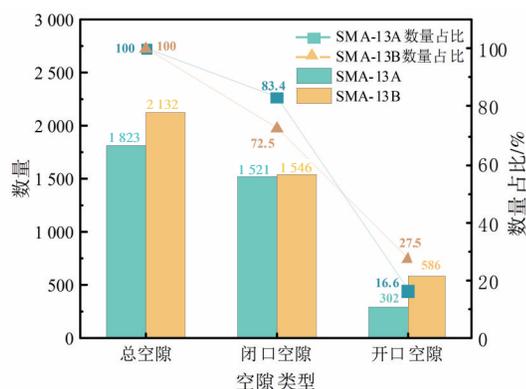


图7 空隙数量及其占比

Fig. 7 Pore quantities and their proportions

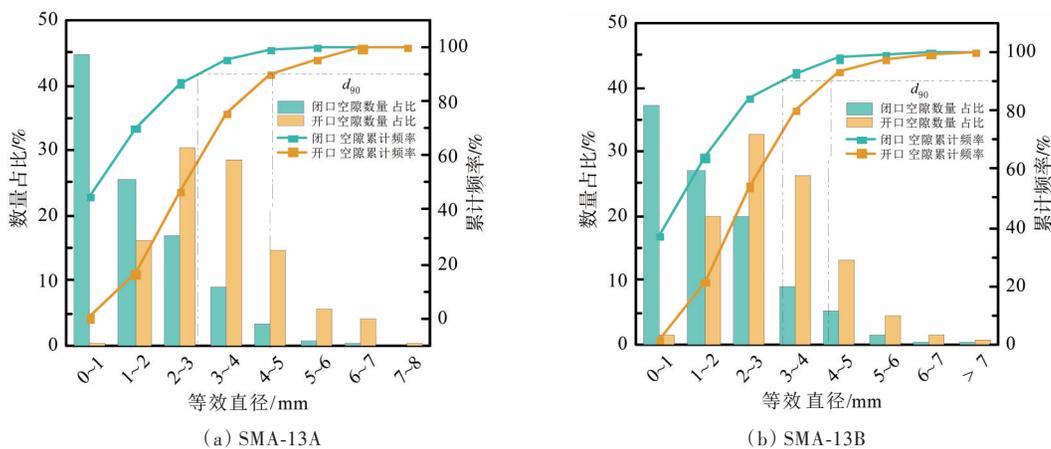


图8 空隙数量分布情况

Fig. 8 Distribution of pore numbers

2.2.3 空隙体积

图9数据展示了SMA-13A和SMA-13B的各空隙体积和平均体积。从图9可以看出,SMA-13A的总空隙、闭口空隙的整体体积和平均体积,开口空隙的整体体积均比SMA-13B的小,与空隙率大小排序一致。SMA-13A的开口空隙平均体积比SMA-13B的大,与空隙率大小排序不一致。

图10数据展示了SMA-13A和SMA-13B在不同等效直径区间下各空隙的体积分布和累计频率

分布情况。从图10可以看出:1) 与数量分布曲线不同,两种试件的空隙体积分布曲线都随等效直径的变大呈现先增后减的趋势。2) SMA-13A的闭口空隙和开口空隙的分布峰值为3~4 mm和4~5 mm,SMA-13B两种空隙的分布峰值均为4~5 mm。3) 两种试件的空隙均出现了小等效直径下闭口空隙体积大,大等效直径下开口空隙体积大的现象;且开口空隙累计频率曲线均在闭口空隙右侧,进一步表明开口空隙较闭口空隙更大。

该现象表明,SMA-13试件在进一步压实的过程中,闭口空隙既不会完全消失,也很难彼此合并成新的空隙,只是体积不断变小;而对于开口空隙

而言,相邻的开口空隙彼此结合成新的更大的开口空隙,导致空隙数量减少而平均体积增大(图11)。

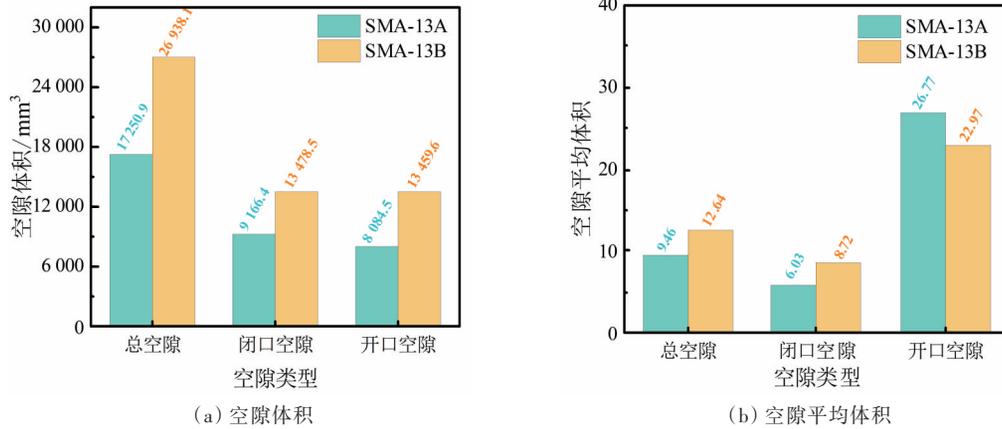


图9 空隙体积和平均体积

Fig. 9 Pore volume and average volum

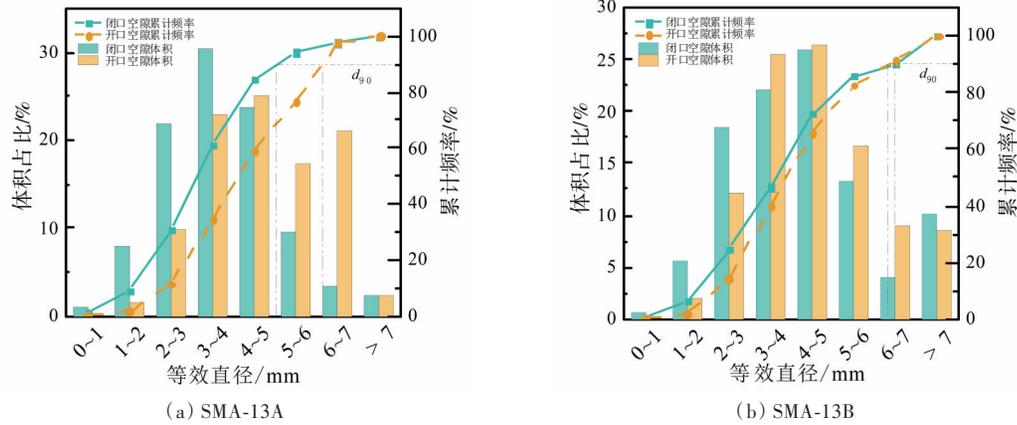


图10 空隙体积分布情况

Fig. 10 Distribution of pore volume

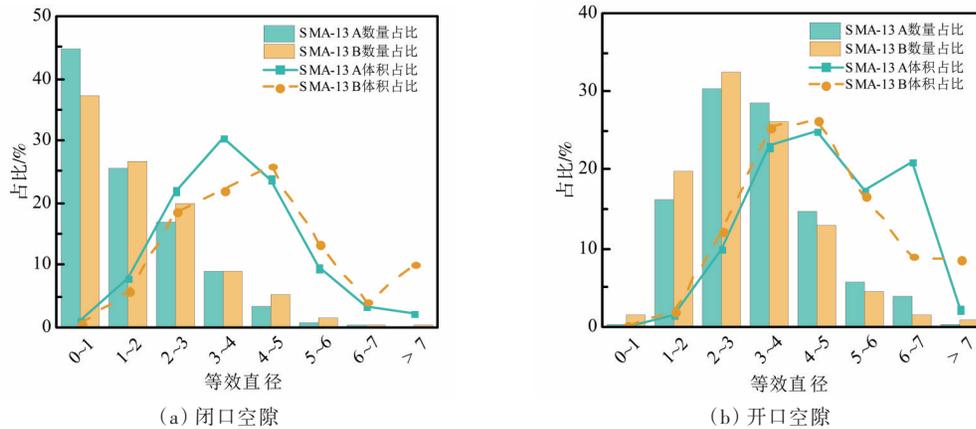


图11 不同等效直径下开口、闭口空隙数量、体积占比

Fig. 11 Connectivity and isolated pore quantity, volume proportions at various equivalent diameters

2.3 空隙主轴方向

沥青混合料试件数字化后,其内部空隙信息极为丰富,本节重点研究空隙主轴方向角(空隙最

长轴与垂直方向的夹角,范围为 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$)的分布规律。图12为空隙主轴方向角的分布情况。若方向角为 0° ,则说明空隙在试件内部是垂直“站着”分

布的,若方向角为 90° ,则说明空隙在试件内部是水平“躺着”分布的。

从图 12 可以看出,沥青混合料的空隙主轴方向角越大,其相应的数量占比也越多。这说明试件内部空隙以水平“躺着”或接近“躺着”为主,垂直“站着”的空隙占比很小。这种现象说明,在沥青混合料成型的过程中,内部空隙在外部击实功的作用下,其空间位置处于不断的变化与重构之中,空隙的主轴方向逐渐趋向于稳定状态。

对于空隙的主轴方向角,感性认识应该是随着进一步压实,空隙会更加接近一个“躺着”的形态。可对比两种不同压实度的 SMA-13 试件,发现随着试件的进一步压实,主轴方向角为 $70^\circ \sim 90^\circ$ 的空隙变少, $0^\circ \sim 70^\circ$ 的空隙变多,平均主轴方向角反而变小,这一现象与通常的感性认识相悖。对 SMA-13 试件进一步压实后其空隙主轴方向角的变化给出一种可能的解释:如图 13 展示的空隙结合过程,相邻的空隙彼此结合成新的空隙之后,新的空隙的主轴方向角会比组成它的旧空隙的小,

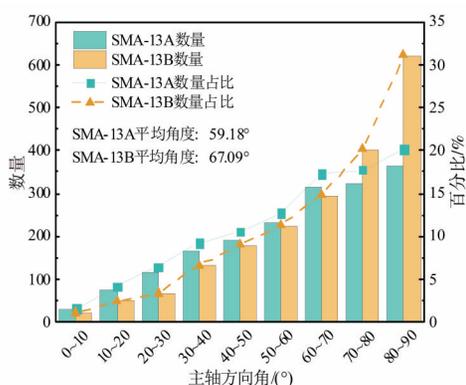


图 12 空隙主轴方向角分布

Fig. 12 Distribution of spindle orientation of pores

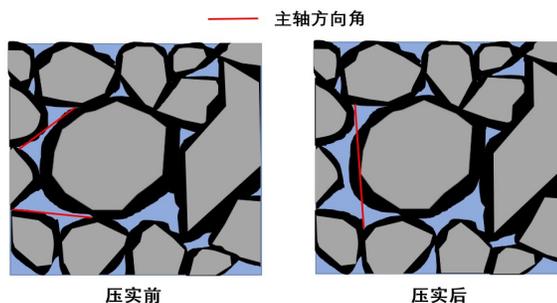


图 13 空隙结合示意图

Fig. 13 Schematic diagram of pore aggregation

这可能是 SMA-13 试件在进一步压实后主轴方向角变小的原因。

2.4 空隙配位数

空隙配位数(coordination number, CN)是指与通过孔喉相连的空隙数目,这是表征空隙连通性的重要参数,如图 14 所示。空隙配位数为零,则表示这个空隙不与其他空隙相连,空隙配位数越大,表明空隙的连通性越好,空隙网络的复杂度越高。本研究的 CN 是通过 PNM 模型计算得出的。

图 15 展示了两种试件的空隙配位数分布情况。从图 15 可以看出:1) SMA-13A 和 SMA-13B 的空隙数量都随着配位数的增加不断减少,配位数小于等于 1 的空隙占比分别为 83.71% 和 69.23%。2) SMA-13A 除配位数为零的空隙比 SMA-13B 的多以外,其余空隙均比 SMA-13B 的少,这说明在进一步压实过程中,会产生更多的微小闭口空隙。3) SMA-13A 的平均配位数分别为 0.596,远小于 SMA-13B 的 1.038,与两者空隙率大小一致,即随着沥青混合料压实度的提高,其内部空隙的平均配位数不断下降,空隙连通性变差,空隙网络的复杂度变低。

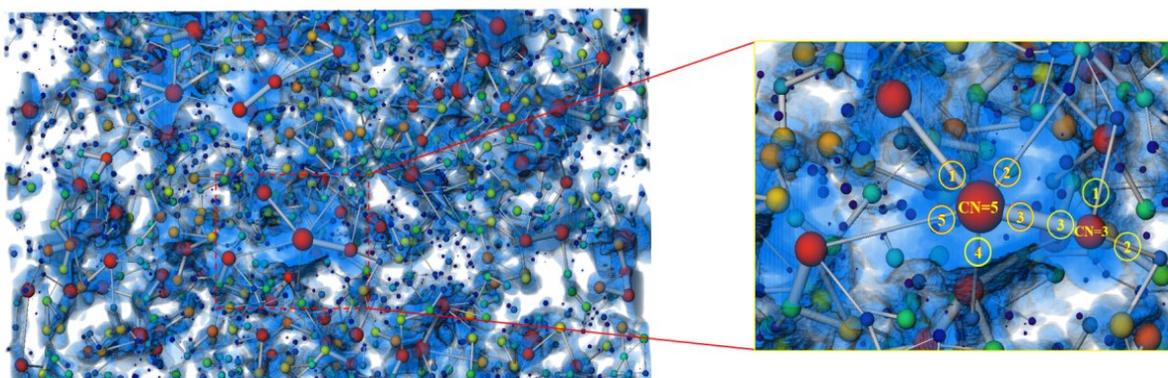


图 14 空隙配位数示意图

Fig. 14 Schematic diagram of pore coordination numbers

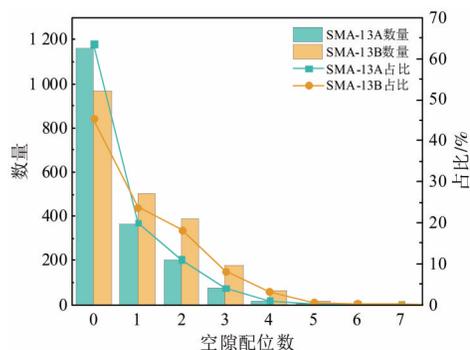


图15 空隙配位数分布图

Fig. 15 Distribution of pore coordination numbers

3 结论

1) 沥青混合料的空隙分布在垂直方向上呈现出两端大中间小的趋势,在水平方向上则表现为四周大中间小。综合两个维度的分析显示,沥青混合料的空隙分布具有外部大内部小的特征。

2) 随着沥青混合料进一步压实,闭口空隙体积逐渐减小,而相邻开口空隙的结合导致开口空隙数量减少但平均体积增大。

3) 沥青混合料内部的空隙以水平“躺着”或接近“躺着”为主,而垂直“站着”的空隙占比较小。随着进一步压实,相邻空隙结合形成新空隙,其主轴方向角有时比旧空隙的小。

4) 随着沥青混合料压实度的提高,内部空隙的平均配位数逐渐下降,空隙连通性变差,空隙网络的复杂度降低。

[参考文献]

- [1] 刘培荣. 空隙率对高黏弹混合料水稳定性的影响及合理空隙率的确定[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(1): 10-16, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.01.002.
LIU Peirong. The effect of air voids on moisture sensitivity and the determination of a reasonable air void content for high viscoelastic asphalt mixtures [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(1): 10-16, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.01.002.
- [2] 周志刚, 郭安顺, 俞文生, 等. 沥青混合料渗透性影响因素分析[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2017, 14(1): 1-9, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.01.001.
ZHOU Zhigang, GUO Anshun, YU Wensheng, et al. Analysis of influencing factors on permeability of asphalt mixture [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2017, 14(1): 1-9, 47. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2017.01.001.
- [3] LACROIX A, KIM Y R, ARELLANO C. Comparison of dynamic moduli for asphalt mixtures determined from different geometries and compactions [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(6): 1006-1014. DOI: 10.1520/jte104610.
- [4] DESSOUKY S. Laboratory and field evaluation of asphalt concrete mixture workability and compactability [C]//Airfield and Highway Pavements 2015. Miami: American Society of Civil Engineers, 2015.
- [5] LEE M S, KIM S, KIM K W. Estimation of optimum compaction temperature for PMA and WMA mixtures by volumetric property evaluation [J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, 40(3): 463-475. DOI: 10.1520/jte103943.
- [6] LIU P F, XU H N, WANG D W, et al. Comparison of mechanical responses of asphalt mixtures manufactured by different compaction methods [J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 765-780. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.082.
- [7] XU H N, YAO X G, WANG D W, et al. Investigation of anisotropic flow in asphalt mixtures using the X-ray image technique: pore structure effect [J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 20(3): 491-508. DOI: 10.1080/14680629.2017.1397047.
- [8] XIONG R, JIANG W Y, YANG F, et al. Investigation of voids characteristics in an asphalt mixture exposed to salt erosion based on CT images [J]. Materials, 2019, 12(22): 3774. DOI: 10.3390/ma12223774.
- [9] GONG Y F, BI H P, LIANG C Y, et al. Microstructure analysis of modified asphalt mixtures under freeze-thaw cycles based on CT scanning technology [J]. Applied Sciences, 2018, 8(11): 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
- [10] 李盛, 张豪, 房硕, 等. CT扫描在路面加铺层结构中的应用研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(3): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.03.001.
LI Sheng, ZHANG Hao, FANG Shuo, et al. Application of CT scan in pavement overlay structure [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(3): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9331.2020.03.001.
- [11] ZHANG J T, YANG J, LIU T J, et al. Study on void structure reconstruction of asphalt mixture by X-ray computed tomography and Otsu's method [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 4546731. DOI: 10.1155/2020/4546731.

- [12] JIANG J W, ZHANG Z, DONG Q, et al. Characterization and identification of asphalt mixtures based on convolutional neural network methods using X-ray scanning images [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 174: 72–80. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.083.
- [13] ZHAO Z L, JIANG J W, NI F J, et al. 3D-reconstruction and characterization of the pore microstructure within the asphalt FAM using the X-ray micro-computed tomography [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 272: 121764. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121764.
- [14] MAHMUD M Z H, HASSAN N A, HAININ M R, et al. Microstructural investigation on air void properties of porous asphalt using virtual cut section [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 155: 485–494. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.103.
- [15] JIANG W, SHA A M, XIAO J J. Experimental study on relationships among composition, microscopic void features, and performance of porous asphalt concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 27(11): 4015028. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001281.
- [16] 杨若冲,梁锡三,赖用满. 沥青路面水损害典型原因与对策 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(6): 749–753. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2008.06.008.
YANG Ruochong, LIANG Xisan, LAI Yongman. Typical causes and countermeasures of moisture damage for asphalt pavement [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2008, 36(6): 749–753. DOI: 10.3321/j.issn:0253-374X.2008.06.008.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路沥青路面施工技术规范: JTG F40—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical specifications for construction of highway asphalt pavements: JTG F40—2004 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2005.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程沥青及沥青混合料试验规程: JTG E20—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Standard test methods of bitumen and bituminous mixtures for highway engineering: JTG E20—2011 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2011.
- [19] SILIN D, PATZEK T. Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 371(2): 336–360. DOI: 10.1016/j.physa.2006.04.048.
- [20] LING S L, SUN Y, SUN D Q, et al. Pore characteristics and permeability simulation of porous asphalt mixture in pouring semi-flexible pavement [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 330: 127253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127253.
- [21] 钱尼贵,王端宜,厉淡宁. 沥青路面裂缝细观渗流特性及试验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 415–423. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2019.03.013.
QIAN Nigui, WANG Duanyi, LI Danning. Analysis and experimental investigation of mesoscopic seepage characteristics of asphalt pavement crack [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(3): 415–423. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2019.03.013.

(责任编辑:赵冰;校对:石月珍;英文编辑:李岳林)