

孙瑜, 吉罗, 吕沁轩, 等. 基于 Avizo 的排水型固废沥青混合料三维孔隙重构[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(6): 21-26.
DOI: 10. 20169/j. issn. 2095-2163. 25011502

基于 Avizo 的排水型固废沥青混合料三维孔隙重构

孙瑜, 吉罗, 吕沁轩, 黄崇伟

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为研究排水型固体废弃物沥青混合料的三维微观孔隙结构, 本文通过选取不同固废集料, 基于 CT 扫描技术和 Avizo 软件对排水型固废沥青混合料的孔隙结构进行了三维重构, 建立了排水型固废混合料内部孔隙的三维可视化模型, 对孔隙率、孔隙数量、逐层面孔率、孔隙等效直径等参数进行了量化分析, 揭示了不同固废集料对孔隙结构的影响, 为混合料的性能评估和优化设计提供新的思路和方法。

关键词: 固体废弃物; OGFC; 沥青混合料; 孔隙; 三维重构

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)06-0021-06

Three-dimensional pore reconstruction of drainage solid waste asphalt mixture based on Avizo

SUN Yu, JI Luo, LÜ Qinxuan, HUANG Chongwei

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: For the study of the three-dimensional microscopic pore structure of the drainage solid waste asphalt mixture, this paper selects different solid waste aggregates, and reconstructs the pore structure of the drainage solid waste asphalt mixture based on CT scanning technology and Avizo software. The three-dimensional visualization model of the internal pores of the drainage solid waste mixture is established, and the parameters such as porosity, pore number, layer-by-layer surface porosity, and pore equivalent diameter are quantitatively analyzed. The influence of different solid waste aggregates on the pore structure is revealed, which provides new ideas and methods for the performance evaluation and optimization design of the mixture.

Key words: solid waste; OGFC; asphalt mixture; pore; three-dimensional reconstruction

0 引言

近年来,天然砂石材料需求量增加,与产量增加的固体废弃物之间形成新型供求关系,固体废弃物的资源化利用已成为当前环境保护和可持续发展的重要议题^[1-2]。当前,固体废弃物处理及综合利用的研究和技术主要集中在废弃物的分类和特性研究、废弃物处理技术的研究和开发、废弃物资源化和资源化利用的技术和策略以及废弃物管理政策和制度的研究几个方面^[3-4],但仍存在处理效率低下、处理成本高等问题,现阶段应该通过发展新的应用技术,提高资源利用效率,减少资源浪费,推动国内固体废弃物处理及资源化利用产业的发展。

由于公路建设的高速发展造成路面积水引发的城市内涝问题已不容忽视^[5]。传统的密级配沥青路面孔隙率较低,在雨天行车时容易产生水雾,影响行车视野和安全。排水沥青路面在透水性能、防滑特性及降噪效果等方面性能优良^[6-7],是解决城市水循环问题的有效方案。排水沥青路面的孔隙对其性能影响极大,传统的宏观孔隙测试方法难以准确反映混合料内部孔隙结构的真实情况,而通过对排水沥青混合料的内部孔隙进行三维重构可以从细观角度更深入地理解其孔隙结构。

借助 X-ray CT 扫描技术,可以无损地检测试件的内部结构^[8-9],获得每一层面的清晰图像,结合三维重构软件能够在细观层面上提取孔隙的各类特征

基金项目: 国家自然科学基金(52472324); 国家重点研发计划(2023YFC2907301); 交通运输部交通行业重点科研项目(2022-ZD4-039)。

作者简介: 孙瑜(1989—),女,博士,副教授,主要研究方向:道路工程材料,固体废弃物资源化利用。

通信作者: 黄崇伟(1983—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:智能型、功能型交通基础设施。Email:hcwei@126.com。

收稿日期: 2025-01-15

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

参数,如孔隙率、孔隙等效直径、比表面积和孔隙弯曲度等^[10-12],这些特征参数为进一步研究孔隙结构对混合料性能的影响提供了重要依据。此外,Jing 等学者^[13-14]还通过 Avizo 软件对多孔沥青混合料的内部孔隙结构进行了三维重建和分析,揭示了孔隙的几何特征和连通性,从直观视角对内部孔隙结构进行了深入研究,极大地丰富了孔隙结构的研究内容^[15-17]。但到目前为止针对排水型固废沥青混合料的孔隙特征的综合分析研究还比较少,为此,本文从细观角度出发,对排水型固废沥青混合料的孔隙分布进行二维提取和三维重构,解析其孔隙特征,为排水型固废沥青路面结构的设计提供依据和参考。

1 排水型固废沥青混合料试件制备

1.1 原材料选择

本文试验制备排水型固废沥青混合料中选用的沥青为高黏改性沥青,天然集料为石灰岩集料,矿粉选用的石灰岩矿粉,天然集料及沥青均由上海浦东路桥沥青材料公司提供,且性能均满足《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20-2011)^[18]的要求。

本文试验中所用的固体废弃物选用了废弃玻璃、废弃红砖、废弃瓷砖、废弃混凝土及钢渣。同种材料均来自同一产地、同一批次。固废集料的外观如图 1 所示。



图 1 固废集料原材料外观图

Fig. 1 Appearance diagram of waste aggregate raw materials
根据《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190-2012)^[19]对固废集料进行物理性质试验后,结果表

明废弃玻璃的针片状含量过高,废弃红砖的压碎值和吸水率过高,废弃瓷砖的表现相对密度和吸水率不符合规范要求,因此所选废弃玻璃、废弃红砖及废弃瓷砖不适合代替粗集料用于排水沥青混合料中,而废弃混凝土和钢渣性能表现良好,可以考虑用于制备排水型固废沥青混合料。

1.2 试件制备

本文采用马歇尔试验设计方法,根据《透水沥青路面技术规程》(CJJ/T 190-2012)^[19]推荐的级配范围进行沥青混合料配合比设计。本文设计了 3 种级配类型,用天然石灰岩集料和天然石灰岩矿粉进行对照组排水沥青混合料的配合比设计,代号分别为 A1、A2、A3,将废弃混凝土全替代粗集料进行排水型固废沥青混合料的配合比设计,代号分别为 B1、B2、B3,将钢渣全替代细集料进行排水型固废沥青混合料的配合比设计,代号分别为 C1、C2、C3,对比分析其孔隙率对其性能的影响。沥青混合料矿料级配曲线如图 2 所示。

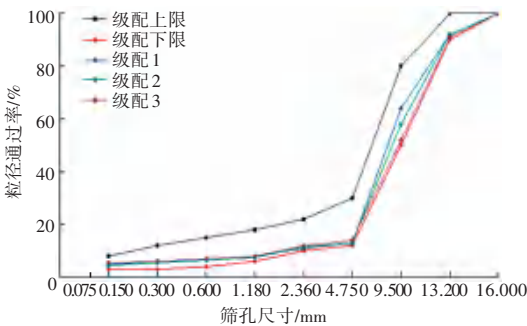


图 2 不同级配沥青混合料的级配曲线

Fig. 2 Gradation curve of asphalt mixture with different gradation
根据排水沥青路面的设计要求,排水沥青混合料的目标孔隙率范围应该控制在 18%~25%,因此根据上述设计级配和沥青用量制备标准马歇尔试件并计算体积参数。最终确认的沥青用量和体积参数计算结果见表 1。

表 1 排水型固废沥青混合料级配体积参数计算结果

Table 1 Calculation results of gradation volume parameters of drainage solid waste asphalt mixture

混合料类型	沥青用量/%	理论最大相对密度	毛体积密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	矿料间隙率/%
A1	4.2	2.678	2.158	19.4	27.7
B1	4.2	2.324	1.907	17.9	23.2
C1	4.2	2.324	1.889	18.5	24.5
A2	4.0	2.682	2.130	20.3	28.2
B2	4.0	2.678	2.149	19.5	27.9
C2	4.0	2.658	2.142	19.2	28.1
A3	4.5	2.734	2.092	23.2	30.9
B3	4.5	2.726	2.160	20.5	28.9
C3	4.5	2.709	2.121	21.5	30.3

2 排水型固废沥青混合料的 CT 图像扫描及三维重构

2.1 图像扫描

为研究排水型固废沥青混合料内部孔隙的微观结构特性,本研究选取了 A1、B1、C1 三个相同级配不同固废集料的沥青混合料试件进行了 CT 扫描,该设备的管电压为 210 kV,管电流为 0.33 mA。将制备好的排水型固废沥青混合料试件固定于三维显微镜样品台上。其中 X 、 Y 、 Z 及 r 四个坐标可以用于调整样品台的位置。样品台在测试过程中发生旋转时,应保持排水型固废沥青混合料试件与样品台的位置不变,从而保证数据能实现高精度的重建。并将 CT 图像按扫描顺序保存为灰度图像,为后续的研究提供数据基础,扫描图像如图 3 所示。

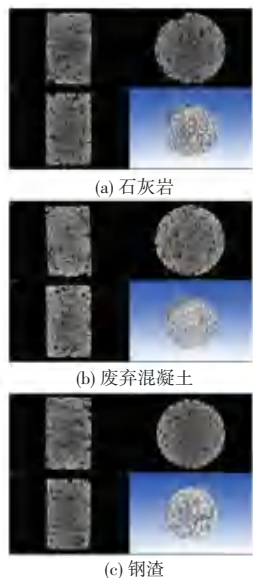


图 3 排水型固废沥青混合料扫描图

Fig. 3 Scanning diagram of drainage type solid waste asphalt mixture

2.2 图像处理

由图 3 可知,排水型固废沥青混合料由集料、沥青和孔隙等不同物质组成,由于沥青与集料之间的渗透作用,CT 扫描图像边界较为模糊,需要对图像进行处理,明确孔隙位置。在 Avizo 软件里,经常使用中值滤波等方法对二维图像进行滤波降噪。对图片滤波处理是为了去除由环境原因产生的图像噪点,提高图片的质量,以便于更好地识别图片中的孔隙^[20]。此外利用 Interactive Thresholding 命令能够依据图像灰度值的差异,精准地将图像划分为混合料区域与孔隙区域,经交互式阈值分割后,孔隙区域被清晰地标识为蓝色,如图 4 所示。通过对比可以

明显看出,分割过程极为精确地描绘了孔隙结构的边界,这为后续构建孔隙网络模型奠定了坚实的基础。

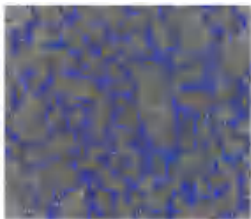


图 4 阈值分割后图像

Fig. 4 Image after threshold segmentation

2.3 三维微观结构重构

在上述图像处理的基础上,需要对独立的 CT 扫描切片进行三维重构。目前多孔材料的三维重构有体绘制和面绘制两种方法^[21],本文选用 Avizo 中的 Volume Rendering 模块。基于以孔隙居中轴线为体系^[22]的插值的体渲染技术对二维图像数据进行预处理,以增强孔隙结构的可视化效果,为后续分析提供清晰、准确的图像基础。构建三维孔隙模型所用到的计算模块为 Axis Connectivity 模块和 Analysis Filter 模块,并通过 Arithmetic A-B 算法和 Arithmetic A + 2×B 算法分别生成连通孔隙模型和总孔隙模型。经 Avizo 孔隙相关模块处理后,可以有效构建排水型固废沥青混合料的三维微观孔隙模型,所得的总孔隙模型如图 5 所示,为进一步分析排水型固废沥青混合料的微观孔隙结构研究和应用提供有力支持。

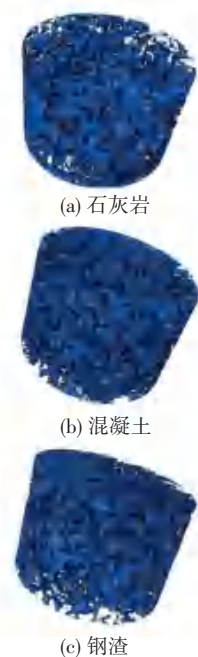


图 5 排水型固废沥青混合料孔隙模型

Fig. 5 Pore model of drainage type solid waste asphalt mixture

3 排水型固废沥青混合料的孔隙特征分析

在制备排水型固废沥青混合料的马歇尔试件过程中,有诸多因素会影响试件孔隙,如试件成型温度、试件插捣技术及预设孔隙率不同等会使形成的孔隙结构尺寸不一、形态多样。为了深入理解沥青混合料的孔隙构造,对其孔径分布及形态特征进行研究,本文将基于 Avizo 中 Label Analysis 模块计算得出的孔隙率、等效直径等孔隙几何特征细观参数进行研究。

3.1 孔隙率

孔隙率是材料孔隙体积与材料总体积的比值。通过计算每一张二维 CT 图像上孔隙占总截面面积的比值,得到单张图像的孔隙率,对所有 CT 图片进行计算,并求均值得到试件的总体孔隙率,计算公式为:

$$n = \sum_{i=1}^N \frac{(A_v)_i}{A_T} / N \tag{1}$$

其中, n 表示总体孔隙率; i 表示 CT 二维切片图像张数; N 表示 CT 二维切片图像总数; A_v 表示单张图像的孔隙面积; A_T 表示单张图像试件截面面积。

利用 Avizo 软件对孔隙进行量化分析,孔隙率的计算结果见表 2。

表 2 实际孔隙率与模型孔隙率对比

Table 2 Comparison of actual porosity and model porosity			
级配类型	实际孔隙率/%	模型孔隙率/%	差值
A1	19.4	18.3	1.1
B1	17.9	17.7	0.2
C1	18.5	17.9	0.6

由表 2 中数据可知,经过三维重构后得到的孔隙率与实测值误差较小,这表明本研究采用的 CT 扫描技术满足了精度要求。但是相较于实验室直接测量的孔隙率,经软件模拟计算得出的孔隙率略低,这可能是由于 CT 扫描图像在识别孔隙时存在精度限制,导致集料、沥青胶浆等固体物质边缘区分度较低,对于微小孔隙的识别能力相对较弱。

3.2 逐层面孔率

逐层面孔率是指沿切片张数根据孔隙阈值提取沥青混凝土试件扫描图片内部孔隙的二值图,利用二值图计算得出的每张切片孔隙面积与试件截面积的比值,即每张切片的孔隙率。在 Avizo 中调用 Volume Fraction,参数选择 XY,点击 Apply 后可以输出试件的逐层面孔率,图 6 为 3 种不同材料试件的逐层面孔率。

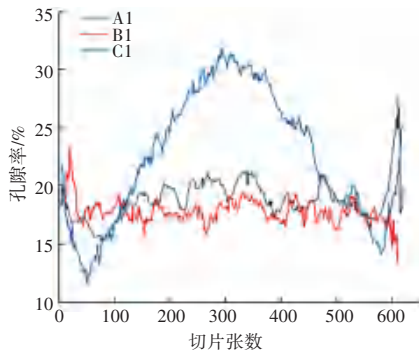


图 6 不同材料试件逐层面孔率

Fig. 6 The layer-by-layer surface porosity of test pieces with different materials

由图 6 可知,A1 石灰岩试件和 B1 混凝土试件的逐层面孔率整体分布相对均匀,孔隙分布状况比较理想;而 C1 钢渣试件的逐层面孔率分布则呈现出两头低、中间高的“凸”形趋势,分布不均匀。这是由于在沥青混合料的压实过程中,随着压实程度的不断提升,不同部位的孔隙变化速率存在差异,导致不同部位的孔隙分布不同。且不同固废集料的性能不同,抗压能力也有所不同,这种差异进一步影响了孔隙率的变化模式。石灰岩试件和混凝土试件由于其颗粒形状较为规则,且硬度适中,在压实过程中保持较好的稳定性,因此孔隙率的变化相对平稳,整体分布较为均匀。而钢渣颗粒通常具有较硬的质地和不规则的形状,这使得在压实过程中颗粒间的相互作用更为复杂,随着压实过程的进行,钢渣颗粒逐渐紧密排列,孔隙率逐渐降低。然而,当压实到一定程度时,由于钢渣颗粒间的相互嵌锁作用,孔隙率的下降速度会减缓,甚至在某些区域由于颗粒的重新排列和嵌锁,孔隙率会出现回升。随着压实过程的持续进行,最终孔隙率会再次降低。

3.3 孔隙数量及孔隙等效直径

孔隙等效直径是指材料内部孔隙的有效直径,通常情况下,等效直径是一个综合考虑了孔隙几何形状、大小、分布以及材料之间的相互作用的参数。由于固废沥青混合料的内部孔隙空间几何形状较不规则,为了便于对孔隙特征进行进一步的研究与分析,通常采用等效圆度的计算方法。该方法基于孔隙面积相等的原则,将形态不规则的孔隙图形转化为标准的圆形进行处理,以此实现对孔隙形态的有效判别。

断面平均孔隙等效直径 d 代表某一试件各断面中,通过 CT 图像阈值分割后统计得出的孔隙总面积与孔隙数量之比,经加权平均处理所得到的单个孔隙直径估算值,其计算公式为:

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \tag{2}$$

$$d = 2 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \tag{3}$$

$$d_i = 2 \sqrt{\frac{A_i}{\pi}} \tag{4}$$

其中, A 表示某一断面的平均孔隙面积, 单位为 m^2 ; A_i 表示某一断面上任一孔隙的面积, 单位为 m^2 ; n 表示孔隙个数; d 表示断面平均孔隙等效直径; d_i 表示断面上任一孔隙的等效直径。

而在 Avizo 软件中基于 Label Analysis 模块在属性窗口中自定义测量参数, 可以直接计算输出等效直径 (EqDiameter) 参数。不同材料试件的孔隙数量如图 7 所示。

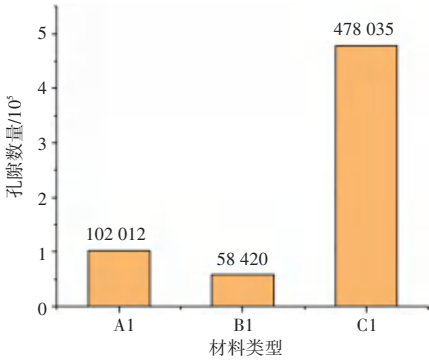


图 7 不同材料试件的孔隙数量

Fig. 7 The pore count of test pieces with different materials

由图 7 可知, 混凝土试件的孔隙数量少于石灰岩试件, 与混凝土试件的孔隙率小于石灰岩试件这一结论相吻合, 而钢渣试件虽然拥有较多孔隙, 但由于孔隙分布不均, 导致综合孔隙率较小。

不同材料试件的孔隙等效直径分布如图 8 所示。

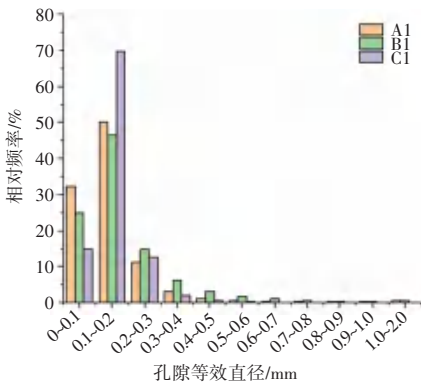


图 8 不同材料试件的孔隙等效直径分布图

Fig. 8 The pore equivalent diameter distribution of test pieces with different materials

由图 8 可知, 3 种材料的孔隙等效直径范围大都集中在 $0 \sim 0.3 \text{ mm}$, 其中 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 区间的孔隙等效直径比例最高。石灰岩沥青混合料和混凝土沥青混合料的孔隙等效直径分布则相对较为均匀, 表明混凝土试件的孔隙结构相对较为稳定, 与图 6 中逐层面孔率的结果一致。而钢渣沥青混合料的孔隙等效直径分布呈现出一定的特异性, 69.6% 的孔隙等效直径都集中在 $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ 区间, 在其他区间的孔隙比例则相对较低, 可能与材料本身的特点有关。

4 结束语

本文基于 CT 扫描技术和 Avizo 软件, 对排水型固废沥青混合料的孔隙结构进行了深入的三维重构与分析, 并得出以下结论:

(1) 基于 Avizo 的三维重构技术为排水型固废沥青混合料的孔隙结构研究提供了强有力的工具。该技术不仅实现了孔隙结构的可视化, 还通过量化分析揭示了孔隙的几何特征和分布规律, 为混合料的性能评估和优化设计提供了重要依据。

(2) 通过对比不同固废集料 (如废弃混凝土、钢渣) 制备的沥青混合料的孔隙特征, 认为固废集料的种类和性能对孔隙结构有显著影响。因此在固废沥青混合料的配合比设计和制备过程中, 需要充分考虑固废集料的性能差异, 以优化孔隙结构, 提升混合料的整体性能。

(3) 本文通过量化分析孔隙率、孔隙数量、逐层面孔率以及孔隙等效直径等参数, 初步探讨了孔隙结构与混合料性能之间的关系, 但仍有许多孔隙参数以及孔隙结构对排水型固废沥青混合料的渗透性能的具体影响有待进一步研究。

参考文献

[1] 谢恩连, 李文举, 周楚淮. 钢渣排水沥青路面渗水性能研究[J]. 价值工程, 2023, 42(9): 149-151.

[2] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部印发《固体废物分类与代码目录》和《固体废物污染环境防治信息发布指南》[EB/OL]. [2025-01-06]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/gtfwyhxpj/gtfw/202404/t20240403_1070030.shtml.

[3] 董洪胜. 城市固体废弃物处理技术现状与管理对策[J]. 皮革制作与环保科技, 2023, 4(5): 105-107.

[4] 罗宝芳. 城市固体废弃物处理及资源化利用途径[J]. 资源节约与环保, 2022(5): 80-83.

[5] ZHENG Dong, QIAN Zhendong, LIU Yang, et al. Prediction and sensitivity analysis of long-term skid resistance of epoxy asphalt mixture based on GA-BP neural network[J]. Construction and Building Materials, 2018, 158: 614-623.

[6] 蔡正森, 范剑伟, 马涛, 等. 雨水冲刷作用下双层排水沥青路面空隙堵塞特性[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2023,53(4): 609-616.

[7] 何熹. 排水沥青路面(PAC-13)在沿海多雨地区高速公路的应用[J]. 西部交通科技, 2021(4): 55-58.

[8] WU Yue, LI Yanzhi, QIAO Weiguo, et al. Water seepage in rocks at micro-scale[J]. Water, 2022,14(18): 2827.

[9] ZHANG Jicheng, SANG Sheng, MA Tianran, et al. Shale microstructure extraction based on micro-CT and permeability inversion[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2022,40(6): 3245-3254.

[10] FAN Chaojun, JIANG Xiaofeng, FAN Nan, et al. Scale effect of coal porosity and permeability characteristics based on CT 3D reconstruction from a microperspective [J]. Energy & Fuels, 2024,38(3): 1813-1821.

[11] SHI Y, ZHANG H, ZHAO S. Evolution of microstructural characteristics of porous asphalt mixture under progressive clogging and its effect on drainage performance [J]. Construction and Building Materials, 2024,441: 137572.

[12] MENG Anxin, XING Chao, TAN Yiqiu, et al. Investigation on clogging characteristics of permeable asphalt mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2020,264: 120273.

[13] JING Hualong, DAN Hancheng, SHAN Hongyu, et al. Investigation on three-dimensional void mesostructures and geometries in porous asphalt mixture based on Computed Tomography (CT) images and avizo [J]. Materials, 2023, 16(23): 7426.

[14] 蔡沛辰, 阙云, 李显. COMSOL 与 AVIZO 联合仿真土体三维细观渗流特性[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021,49(6): 856-862.

[15] 金智敏, 周宏伟, 薛东杰. 煤岩 CT 图像的孔隙度和比表面积测量方法[J]. 西安科技大学学报, 2020,40(1): 133-140.

[16] JIAN Lingchen. 3D imaging and flow analysis of sandstone pore structure[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024,2798(1): 012003.

[17] 孙家瑞. 非均质多孔介质浸渗过程模拟研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2023.

[18] 交通运输部公路科学研究院. 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.

[19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 透水沥青路面技术规程(CJJ/T 190-2012) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[20] 吕悦晶, 张沪生, 汤文, 等. 基于沥青混合料均匀性分析的有限元劈裂(IDT)仿真研究[J]. 智能计算机与应用, 2022,12(10): 101-106.

[21] 陈俊. 级配不连续砾石土孔隙三维表征及渗透性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023.

[22] 雷健, 潘保芝, 张丽华. 基于数字岩心和孔隙网络模型的微观渗流模拟研究进展[J]. 地球物理学进展, 2018,33(2): 653-660.