文章编号:1007-9629(2023)07-0723-08

基于X-CT的泡沫混凝土孔隙结构 与导热性能

高志涵^{1,2}, 陈 波^{1,2,*}, 陈家林^{1,2}, 袁志颖^{1,2}

(1.河海大学水利水电学院,江苏南京 210098;

2.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏南京 210098)

摘要:为了研究不同密度泡沫混凝土的孔隙结构特征及其导热性能差异,使用X射线计算机断层成 像技术(X-CT)对4种密度的泡沫混凝土试样进行扫描,实现了泡沫混凝土孔隙结构的三维重建.基 于试样的孔隙特征及分布,利用 Matlab软件随机生成代码建立了4种密度的泡沫混凝土模型,并在 Comsol有限元软件中对其稳态传热进行了仿真模拟.结果表明:泡沫混凝土内部的孔径分布近似服 从对数正态分布,随着密度的增大,试样的孔隙率和孔径随之减小,孔隙形状逐渐趋于球状;泡沫混 凝土内部传热主要在水泥基体中进行,少部分热流会穿过小尺寸孔隙,而大尺寸孔隙增大了热流的 传导路径,对泡沫混凝土的导热性能影响较大.

关键词:泡沫混凝土;X射线计算机断层成像技术(X-CT);孔隙特征;Comsol有限元软件;稳态传热 中图分类号:TU528.01 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.004

Pore Structure and Thermal Conductivity of Foam Concrete Based on X-CT

GAO Zhihan^{1,2}, CHEN Bo^{1,2,*}, CHEN Jialin^{1,2}, YUAN Zhiying^{1,2}

(1. College of Water-Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the difference of pore structure and thermal conductivity of foam concrete with different densities, X-ray computer tomography(X-CT) was used to scan foam concrete samples of four densities, and the three-dimensional reconstruction of pore structure of foam concrete was realized. Based on the pore characteristics and distribution of the sample, the foam concrete models of four densities were established by using the randomly generated code of Matlab, and the steady-state heat transfer was simulated in Comsol finite element software. The results show that the pore size distribution of foam concrete approximately obeys lognormal distribution. The porosity and pore diameter decrease with the increase of density, and the pore shape tends to be spherical. The internal heat transfer of foam concrete is mainly carried out in the cement matrix. A small part of the heatflow will pass through small pores, while large pores increase the conduction path of heat flow, which has a great influence on the thermal conductivity of foam concrete.

Key words: foam concrete; X-ray computer tomography (X-CT); pore characteristic; Comsol finite element software; steady-state heat transfer

收稿日期:2022-08-28;修订日期:2022-10-12

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52079049);国家自然科学基金重点项目(51739003);国家重点实验室基本科研业务费(522012272) 第一作者:高志涵(1998—),男,河南洛阳人,河海大学硕士生.E-mail:hhugaozhihan@163.com

通讯作者:陈 波(1986—),男,浙江绍兴人,河海大学教授,博士生导师,博士.E-mail:chenbo@hhu.edu.cn

泡沫混凝土是一种轻质多孔材料,在浇筑时通过 物理或化学方法将空气引入到水泥浆体中,养护后在 其内部形成大量的气孔.由于空气的导热系数远低于 水泥基体,相较于普通混凝土,泡沫混凝土在保温隔 热方面有着显著的优势[1-2].泡沫混凝土的孔隙特征是 影响其热学性能的关键^[3],国内外学者对其进行了许 多研究.Chen等^[4]借助Matlab软件生成泡沫混凝土的 数值模型,从数值仿真角度分析了影响多孔材料导热 系数的因素.Li等⁵⁵研究了发泡气体和水泥种类对泡 沫混凝土导热系数的影响,并提出了提高泡沫混凝土 隔热性能的建议.李翔宇等^[6]在Cheng-Vachon模型的 基础上提出了针对两相复合材料的导热系数模型,并 在泡沫混凝土的导热系数预测中进行了验证.近年 来,随着对泡沫混凝土研究的深入,其应用范围逐渐 从路基填充、房屋保暖发展到机场跑道减震、大型结 构保温等场景,未来将有望应用于寒区混凝土坝表面 的保温防护中.泡沫混凝土与坝体材料同基,具有相 同的变形收缩系数且耐久性好,有望取代当前所使用 的有机保温材料,这需要对泡沫混凝土内部热传导机 制有着完整且深入的了解.然而当前关于泡沫混凝土 导热性能的研究主要是通过室内试验来完成的,其内 部热流的传导机制尚不明确,缺少数值仿真方面的验 证,而现阶段的仿真多局限于二维情况,模型的孔隙 结构与实际存在较大出入,需要建立一种基于实际孔 隙参数的三维数值模型.

本文基于X射线计算机断层成像技术(X-CT), 对4种不同密度的泡沫混凝土进行扫描,并借助 Avizo软件对试样的二维图像进行堆叠以实现模型 的三维重构.通过分析泡沫混凝土的孔隙率、孔径分 布、球形度等特征来定量获得试样内部的孔隙参数. 在Matlab软件中基于上述参数建立泡沫混凝土的三 维概化模型,利用Comsol有限元软件对泡沫混凝土 的稳态传热进行仿真模拟,建立密度-孔隙结构-导热 系数三者之间的联系.研究结果有助于了解不同密度 泡沫混凝土孔隙结构的差异以及内部热流的传导机 制,为今后在寒区大坝保温防护的应用提供参考.

1 试验

1.1 样品制备

水泥采用海螺牌 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;发 泡剂为聚合物复合发泡剂,按照质量比1:20进行稀 释;水为自来水.按照 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》 规范要求,制备出4种密度的泡沫混凝土试样,其水 灰比(质量比)均为0.6,其余配合比如表1所示.

根据表1中的配合比,采用物理发泡法,将发泡

表 1 泡沫混凝土的配合比和密度 Table 1 Mix proportion and dry density of foam concretes

Sample	Dry density/(kg \cdot m ⁻³)	Mix proportion/(kg $\boldsymbol{\cdot}$ m $^{-3})$			
		Cement	Foaming agent	Water	
A05	513	352.00	41.80	212.00	
A06	611	426.00	40.15	256.00	
A08	822	563.00	37.40	338.00	
A10	1 045	737.00	33.55	442.00	

剂和水按比例进行稀释制备发泡液,再将发泡液加 入发泡机中制出泡沫并测量其密度,当密度满足要 求并且发泡机能够稳定连续供泡时,称取适量泡沫 与水泥浆体混合.在搅拌机中按配合比加入水泥和 水,搅拌至少3min,直至浆体中没有凝聚、结块,再加 入预制泡沫继续搅拌,直至泡沫与水泥浆体混合均 匀.将制备完成的泡沫混凝土浆体倒入量筒中称重, 若湿密度与设计密度之差不超过50 kg/m³,则进行 模具的浇筑.按照上述工艺共浇筑4种密度的泡沫混 凝土并在标准养护条件下养护28 d.

1.2 试验器材和方法

养护结束后,将各密度的泡沫混凝土切割成若 干个直径50 mm、高度50 mm的圆柱体试样,对其进 行X-CT测试.X-CT试验采用德国Y.CT Precision 微焦点X射线及工业CT系统,仪器主要由X射线 源、旋转控制台和监测器组成,最大功率为320W,电 压为195 kV,电流为0.3 mA.取各密度泡沫混凝土试 样进行试验,沿试样的水平断面由上往下逐层扫描, 获取1700张连续的二维断层扫描图像,二维图像的 分辨率为1024像素×1024像素.

在泡沫混凝土的CT图像中,不同材料的灰度值 存在差异,据此可以对材料类型进行分割,如图1所 示.在泡沫混凝土的二维切片中任选一条包含孔隙 和水泥基的线段,使用ImageJ软件得到CT图像沿 该线段分布的灰度值,初步确定泡沫混凝土孔隙和 水泥基的灰度阈值为7500,借助Avizo软件对泡沫 混凝土试样进行三维重构,并基于上述阈值对泡沫 混凝土各部分进行分割.

2 泡沫混凝土孔结构的表征

分别采用真空饱水吸水率法、核磁共振(NMR) 和X-CT这3种方法来测量泡沫混凝土的孔隙率ε.其 中真空饱水吸水率法通过加压抽真空来使水渗透进 入全部孔隙中,按照式(1)给出的计算方法,通过测 量试样饱和前后的质量差来确定试样内部孔隙的体 积,进而求得整体的孔隙率,一般认为此方法得到的 孔隙率为试样的真实孔隙率^[7].



(a) Threshold segmentation of CT data 图1 CT图像灰度分析与阈值分割 Fig. 1 Gray scale analysis and threshold segmentation of CT image

$$\epsilon = \frac{m_{\rm sat} - m_{\rm dry}}{\rho_{\rm w} V} \tag{1}$$

式中:msat为饱和试样的质量;mdry为不含水试样的质 量; ρ_w 为水的密度;V为试样的体积.

分别使用NMR、X-CT和式(1)得到各泡沫混凝 土试样的孔隙率,结果如表2所示.

表2 各泡沫混凝土试样的孔隙率 Table 2 Porosity of foam concrete specimens

Sample	Porosity by X-CT	Porosity by NMR	Calculated porosity
A05	0.621	0.636	0.688
A06	0.524	0.553	0.595
A08	0.471	0.501	0.545
A10	0.385	0.433	0.482



(a) A05



(b) A06

由表2可知,泡沫混凝土的孔隙率随着干密度的 增大而减小,使用NMR和X-CT测得的孔隙率均小 于泡沫混凝土的真实孔隙率.出现上述现象是由于 NMR和X-CT技术存在测试精度和分辨率的限制, 随着试样密度的增大,其内部孔径逐渐减小,受限于 测试精度,NMR和X-CT方法得到的孔隙率会略小 于实际情况,这反映了泡沫混凝土密度增大时其内 部孔径的变化趋势[8].

2.1 不同密度泡沫混凝土的孔径分布特征

泡沫混凝土的保温隔热性能来源于其内部复杂 的孔隙结构,孔隙中空气的存在使其整体导热系数 小于普通混凝土,孔径的大小及其分布对泡沫混凝 土的导热性能有着很大的影响^[9].4种密度的泡沫混 凝土切片图如图2所示.



(c) A08



(d) A10





由图2可知:随着泡沫混凝土密度的增大,切片 上的宏观孔隙(图中黑色部分)数量明显减少;密度 较低的泡沫混凝土内部孔隙形状和孔径分布较为离 散,如试样A05和A06;而试样A08和A10的孔隙更 趋于形状均匀的微小孔.这是由于低密度的泡沫混 凝土在制备过程中,包裹泡沫的水泥浆体占比较小, 形成的水泥基壁较薄,拌和时易出现泡沫合并、消泡 等现象[10],因此所制泡沫混凝土试样的孔径分布较 不均匀.借助Avizo软件计算泡沫混凝土各个孔隙的 孔径、体积、表面积等参数,得到泡沫混凝土的孔径 分布,如图3所示,

由图3可知:随着泡沫混凝土试样密度的增大, 其孔径呈减小的趋势,4种密度试样的平均孔径分别 为1 276.91、1 097.28、582.17、227.95 µm;泡沫混凝 土的孔径分布随着密度的增大而逐渐集中,其中试样 A05和A06的孔径主要集中在1000 µm 以上,在峰值



图 3 泡沫混凝土的孔径分布 Fig. 3 Pore size distribution of foam concretes

附近相邻孔径的孔隙占比与峰值差距不大,但各孔 径的占比均在10.0%以下;而试样A08和A10内部 主要以500、200 µm的孔隙为主,两者的占比分别为 18.3%、35.5%,明显高于其他孔径的孔隙.由此可以 看出随着密度的增大,试样内部小尺寸的孔隙占比 升高且孔径变得更为集中.

对各密度试样的孔径分布图进行拟合,发现其孔 径分布近似服从对数正态分布,拟合曲线的相关系数 R^2 分别为:0.989、0.947、0.890、0.994.可使用式(2)所 示的概率密度函数 $f_x(x; \mu, \sigma)$ 来拟合孔径的分布 特征.

$$f_x(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\left(\ln x - \mu\right)^3}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

式中:x为孔径,x > 0 µm; μ 、 σ 分别为 ln x 的平均值 和标准差.

表3给出了泡沫混凝土的孔隙特征参数.根 据表3中试样的孔隙数量和平均孔径可知:低密 度试样内部孔隙数量较少,但平均孔径一般大于 1000μm;高密度试样内部孔径小而数量多.这一 规律说明低密度泡沫混凝土在制备时存在泡沫合 并、孔隙连通的现象,孔隙体积和形状的不规则导 致试样的热学和力学性能发生变化.

2.2 不同密度泡沫混凝土形状分布特征

泡沫混凝土内部热量传递主要有4种方式:固体间的热量传导、气体间的热传递、孔隙内气体的 对流传热和固体表面之间的辐射换热^[6,11].由于气 体的导热系数远小于水泥等固体的导热系数,可认

	衣う	泡冰混凝土的扎隙特征参数	
Table 3	Pore ch	aracteristic parameters of foam concrete	16

C	Calculated porosity	Average diameter/µm	Pore number	Parameter	
Sample				$\mu/\mu m$	$\sigma/\mu{ m m}$
A05	0.688	1 276.91	35 029	7.2340	0.2860
A06	0.595	1 097.28	50 495	7.1330	0.2910
A08	0.545	582.17	71 938	6.3563	0.4852
A10	0.482	227.95	122 841	5.3870	0.5039

为泡沫混凝土的内部热量传递主要通过水泥基体的热传导来实现^[12-15].泡沫混凝土孔隙的形状特征改变了水泥基体的导热路径,从而影响试样的热学性能,故需要对泡沫混凝土内部孔隙的形状特征进行研究.

孔隙的球形度 ∉ 是指与孔隙相同体积的球体表 面积和孔隙表面积之比,是一个用来描述孔隙形状 与真实球体之间接近程度的物理量^[11].球状孔隙的球 形度等于1,其他形状孔隙的球形度小于1,具体计算 公式如下:

$$\psi = \frac{\sqrt[3]{\pi (6V_1)^2}}{A} \tag{3}$$

式中:A为孔隙的表面积;V1为孔隙的体积.

通过提取4种密度泡沫混凝土试样孔隙的直径、 体积和表面积等参数,代入式(3)中,可得到各试样 孔隙的球形度分布,如图4所示:



由图4可知:试样A05和A06孔隙的球形度分布 主要集中在0.5~0.6之间,球形度等于1.0的球状孔 占比较小,均在10.0%以下,整体孔隙形状较不规 则,其原因主要是在浇筑时试样内部气泡出现了较 多的合并现象;试样A08孔隙的球形度主要分布在 0.7以上,在0.8和1.0处出现双峰;试样A10孔隙主 要为球形度为1.0的球状孔,其中球形度大于0.9的 孔隙占比过半.根据试样孔隙球形度的分布频率计 算得出试样A05~A10孔隙球形度的数学期望分别 为0.552、0.628、0.786、0.873.由此可见,随着密度的 增大,泡沫混凝土内部孔隙逐渐由形状不规则、相互 连通的大尺寸孔隙转为彼此独立、体积较小的球状 孔隙,因而造成试样的性能差异.

3 泡沫混凝土热传导仿真模拟

泡沫混凝土的保温性能是其主要特征之一,可 用导热系数来有效表征.从前文的分析可知,泡沫混 凝土的孔径分布大致服从对数正态分布,将孔径分 布的特征参数与Matlab软件中随机生成的代码相结 合,可模拟泡沫混凝土内部孔隙的分布情况,从而建 立各密度泡沫混凝土的数值模型.结合Comsol有限 元软件对各密度泡沫混凝土的数值模型进行热传导 的仿真模拟,从而探究密度对泡沫混凝土导热系数 的影响.建模的基本步骤如下.

(1)确定孔隙中心位置.假定泡沫混凝土孔隙的 中心位置随机且均匀地分布在试样中,通过随机生 成函数,结合模型的底面半径r和高H可确定各个孔 隙中心的位置:

 $X = r \times \operatorname{rand}(1, 1) \times \cos(2\pi \times \operatorname{rand}(1, 1))$ (4)

 $Y = r \times \operatorname{rand}(1, 1) \times \sin(2\pi \times \operatorname{rand}(1, 1))$ (5)

$$Z = H \times \operatorname{rand}(1, 1) \tag{6}$$

式中:X、Y、Z分别为孔隙中心位置坐标;rand(1,1) 为在 $0\sim1$ 之间生成随机数的Matlab指令.

(2)确定孔径.基于前文分析得到的孔径分布参数(μ和σ),使用log nrnd函数产生孔径服从对数正态分布的一系列孔隙.本文随机生成的孔径控制在μ± 3σ范围内,以防止出现过大或过小的孔隙,同时保证置信度在95%以上.

(3)确定孔隙重叠率 ∂.由于泡沫混凝土在浇筑 过程中存在泡沫合并现象,可利用孔隙重叠率来表 征这一现象.在生成孔隙的过程中,基于前文统计的 各试样孔隙球形度的数学期望来确定孔隙重叠率的 大小,并通过限制2个孔隙中心的距离来确定孔隙之 间的位置关系.

(4)确定孔隙率ε.使用真空饱水吸水率法确定各 密度试样的孔隙率.在随机生成孔隙的过程中,每生 成1个孔隙需计算1次当前孔隙率,直至达到试样的 真实孔隙率时停止生成,并建立Comsol模型.

经过上述步骤可生成指定孔隙率的泡沫混凝土 三维模型,通过稳态传热分析能够得到泡沫混凝土 的温度场、温度梯度和热通量等参数,从而计算得到 材料的导热系数.泡沫混凝土是典型的由水泥基体 和空气组成的两相复合材料,这2类材料的热物理参 数如表4所示.

由于泡沫混凝土内部孔隙和水泥基体的分布较

表 4 材料的热物理参数 Table 4 Thermophysical parameters of materials

Material	Density/ (kg•m ⁻³)	Thermal conductivity/ $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Specific heat capacity/ $(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
Cement	1 800.000	0.930	1 050
Air	1.205	0.023	1 005

为均匀,在分析时为了节省计算成本,可选取试样的 一部分来代替整体进行热传导分析.本文选取底面 半径5mm,高10mm的圆柱体模型代替原试样,采 用四面体单元进行网格划分.以试样A05为例,其模 型及网格划分如图5所示.



图5 泡沫混凝土试样A05的模型及网格划分 Fig. 5 Model and meshing of foam concrete sample A05





实验室中常使用稳态平板法测量泡沫混凝土的 导热系数^[16-17].在Comsol有限元模型中,基于稳态平 板法的原理,对试样的侧面添加热绝缘的边界条件, 并在其上下表面分别添加一块热板和一块冷板,形 成垂直方向上的温度梯度,以此来模拟没有内部热 源的泡沫混凝土的稳态传热情况,其导热系数可通 过下式计算:

$$\lambda = \frac{QH}{D(T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}})} \tag{7}$$

式中: λ 为试样的导热系数:Q为通过试样的总热量: D为试样底面的直径; T_{tot} 、 T_{cold} 分别为热板和冷板的 温度.

基于上述原理,在Comsol有限元模型中对4种 密度的泡沫混凝土模型进行稳态传热分析,模拟结 果如图6所示.





图 6 泡沫混凝土模型的稳态传热分析 Fig. 6 Steady-state heat transfer simulation analysis of foam concrete models

由图6可见,泡沫混凝土表面的等温线在水泥基 体处的分布较为均匀,呈近似平行的分布,而在孔隙 部位出现较大的偏折,热量的变化较为剧烈.这是由 于孔隙内空气的导热系数较小,热量主要通过水泥 基体传导,在孔隙与水泥基体的边界处出现了较大 的温度变化,造成等温线的骤变.此外,孔隙的存在 使泡沫混凝土的导热路径变得更加曲折,阻碍了热 传导的效率,这是泡沫混凝土具有保温隔热功能的 原因之一[18].

随着试样密度的增大,泡沫混凝土表面的等温 线分布趋于均匀.对于密度较小的试样,其内部整体 孔隙占比和孔径较大,对传热的影响程度也较大,因 此低密度的试样内部等温线分布比较曲折;而高密 度的试样由于内部孔径较小,孔隙对于热传导的阻 碍作用不大,整体的等温线分布较为均匀,只在部分 较大的孔隙附近出现变化.

通过计算各密度泡沫混凝土试样的传导热通量(热流)和温度梯度等热物理参数,得到泡沫混凝土的导热系数,同时为验证模拟结果,使用TC5000E导 热系数仪测试了4个试样的实际导热系数,结果如表 5所示.

表 5 泡沫混凝土的导热系数 Table 5 Thermal conductivity of foam concretes

				$W/(m\cdot K)$
Source	A05	A06	A08	A10
Test result	0.128	0.146	0.184	0.258
Comsol simulation	0.153	0.184	0.241	0.305

普通混凝土的导热系数约为1.280 W/(m·K)^[6,19]. 由表5可知,4种密度泡沫混凝土的导热系数均小于 普通混凝土.这是因为泡沫混凝土内部是由孔隙和 水泥基体组成的两相结构而非连续相,气泡的存在 能够有效降低泡沫混凝土的传热效率.随着密度的 增大,试样整体的孔隙率降低,水泥基的占比增大, 导热系数也随之增大.对比试验与仿真结果,两者较 为接近且变化趋势一致,但模拟结果略大于试验结 果.这是因为Matlab软件随机生成的模型是一种基 于泡沫混凝土孔隙特征参数的概化模型,与实际仍 存在差异.数值模型可以分析试样某一部位的热传 导过程,与实际测得的结果相互验证,有助于了解泡 沫混凝土内部的传热机制.为了分析热流在试样内 部的传导情况,以试样A05为例,在其中心位置选取 1个xz方向的工作平面(10 mm×10 mm),得到该平 面内热流的矢量图,如图7所示.

图7展示了热流在通过泡沫混凝土时的大致传导路径,可以看出大部分热流在从热板传递到冷板的过程中会绕开孔隙(图中圆圈所示),从更容易传热的水泥基体中通过.在孔隙密集的区域,部分热流会穿过尺寸较小的孔隙往冷板移动,而绕开大尺寸的孔隙.可认为大尺寸孔隙的存在是泡沫混凝土导热系数减小的主要原因,试样内部的大尺寸孔隙增大了热流传递的路径,降低了传热的效率,从而使低密度的泡沫混凝土具有更低的导热系数,结合表5可以看出:试样A05的导热系数约为试样A10的一半,





说明试样 A05具有更好的保温隔热性能,这与其内部大尺寸孔隙的含量有关.对于用作保温材料的泡沫混凝土,应考虑内部大尺寸孔隙的数量及分布,同时还要考虑孔径对整体强度的削弱程度,充分平衡泡沫混凝土的保温性能和结构强度之间的关系,以寻求最优孔隙率及孔径分布.

4 结论

(1)泡沫混凝土的孔径分布近似服从对数正态 分布,随着密度的增大,其孔隙率和平均孔径均减 小,而200μm以下的孔隙数量明显增多.

(2)泡沫混凝土在浇筑过程中存在泡沫合并现 象,低密度试样内部孔隙的球形度较低,大部分孔隙 相互连通,形状不规则;高密度试样的孔隙主要以球 状孔为主,其球形度的数学期望较高.

(3)基于泡沫混凝土的孔隙特征,利用 Matlab 软件随机生成代码建立的泡沫混凝土概化模型可用来分析其稳态传热过程,模拟结果与试验结果基本吻合.

(4)泡沫混凝土的导热系数随着密度的增大而 增大,具有较好的相关性.其内部大尺寸孔隙对热传 导的影响较大,孔隙的存在增大了热流的传导路径, 使其具有较好的保温隔热性能.

参考文献:

- [1] 佘伟.水泥基多孔材料微结构形成机理与传热行为的研究[D]. 南京:东南大学,2014.
 SHE Wei. Investigation of microstructure formation mechanism and thermal transfer behavior of cement based porous material[D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [2] 张磊,赵倬跃,张楠,等.生土泡沫混凝土的制备及其性能[J].
 建筑材料学报,2022,25(2):199-205.

ZHANG Lei, ZHAO Zhuoyue, ZHANG Nan, et al. Preparation and performance of raw soil foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(2):199-205. (in Chinese)

- [3] 宋强,张鹏,鲍玖文,等.泡沫混凝土的研究进展与应用[J].硅酸盐学报,2021,49(2):398-410.
 SONG Qiang, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Research progress and application of foam concrete [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(2):398-410. (in Chinese)
- [4] CHEN G L, LI F L, GENG J Y, et al. Identification, generation of autoclaved aerated concrete pore structure and simulation of its influence on thermal conductivity[J]. Construction and Building Materials, 2021, 294:123572.
- [5] LI T, HUANG F M, ZHU J, et al. Effect of foaming gas and cement type on the thermal conductivity of foamed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 231:117197.
- [6] 李翔宇,赵霄龙,郭向勇,等.泡沫混凝土导热系数模型及参数修正[J].材料导报,2011,25(20):146-148,152.
 LI Xiangyu, ZHAO Xiaolong, GUO Xiangyong, et al. An effective thermal conductivity equation of foamed concrete and parameter correction [J]. Materials Reports, 2011, 25(20): 146-148,152. (in Chinese)
- [7] 庞超明,王少华.泡沫混凝土孔结构的表征及其对性能的影响
 [J].建筑材料学报,2017,20(1):93-98.
 PANG Chaoming, WANG Shaohua. Void characterization and effect on properties of foam concrete [J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1):93-98. (in Chinese)
- [8] 张振,饶烽瑞,叶观宝,等.基于X-CT技术的气泡轻质土孔隙 结构研究[J].建筑材料学报,2020,23(5):1104-1112.
 ZHANG Zhen, RAO Fengrui, YE Guanbao, et al. Investigation on void structure of foamed light-weight soil with X-CT scanning technique [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5): 1104-1112. (in Chinese)
- [9] GUO Y Z, CHEN X D, CHEN B, et al. Analysis of foamed concrete pore structure of railway roadbed based on X-ray computed tomography[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273:121773.
- [10] 刘科,刘霖,张永鹏.干湿/冻融循环作用下改良隔离墙的渗透 性及孔隙结构[J].建筑材料学报,2022,25(5):545-550.
 LIU Ke, LIU Lin, ZHANG Yongpeng. Permeability and pore structure of improved isolation wall under the action of dry-wet/ freeze-thaw cycles[J]. Journal of Building Materials, 2022,25 (5):545-550. (in Chinese)
- [11] RAJ A, SATHYAN D, BALAJI K, et al. Heat transfer

simulation across a building insulated with foam concrete wall cladding[J]. Materials Today:Proceedings, 2021, 42:1442-1446.

- [12] 丁杨,邓满宇,周双喜,等.基于COMSOL[®]模拟材料孔隙率 与导热系数的演变关系[J].材料导报,2019,33(增刊1):211-213.
 DING Yang, DENG Manyu, ZHOU Shuangxi, et al. The evolution relation between materials' porosity and thermal conductivity based on the simulation by COMSOL[®] software[J].
 Materials Reports, 2019, 33(Suppl 1):211-213. (in Chinese)
- [13] 高延东.气泡结构对泡沫混凝土导热与力学性能影响研究[D].
 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
 GAO Yandong. Thermal conductivity and mechanical performances of foam concrete under the effects of bubbles structure[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] 朱明,王方刚,张旭龙,等.泡沫混凝土孔结构与导热性能的 关系研究[J].武汉理工大学学报,2013,35(3):20-25.
 ZHU Ming, WANG Fanggang, ZHANG Xulong, et al. Research on the relationship between pore structure and thermal conductivity of foamed concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(3):20-25. (in Chinese)
- [15] 张磊,张静,张颖,等.生物基发泡剂泡沫特征及其对泡沫混 凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2020,23(3):589-595. ZHANG Lei, ZHANG Jing, ZHANG Ying, et al. Foam characteristics of biological based foaming agent and its effect on properties of foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020,23(3):589-595. (in Chinese)
- [16] BICER A. Investigation of waste EPS foams modified by heat treatment method as concrete aggregate[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 42:102472.
- [17] 杨正宏,李婷婷,于龙.低密度泡沫混凝土导热系数模型研究
 [J].建筑材料学报,2020,23(2):322-327.
 YANG Zhenghong, LI Tingting, YU Long. Investigations on thermal conductivity models of low density foamed concrete[J].
 Journal of Building Materials, 2020, 23(2):322-327. (in Chinese)
- LIU C, LIU G H. Characterization of pore structure parameters of foam concrete by 3D reconstruction and image analysis [J]. Construction and Building Materials, 2021, 267:120958.
- [19] 周顺鄂,卢忠远,严云.泡沫混凝土导热系数模型研究[J].材料导报,2009,23(6):69-73,83.
 ZHOU Shun'e, LU Zhongyuan, YAN Yun. Study on thermal conductivity model of foamed concrete[J]. Materials Reports, 2009,23(6):69-73,83. (in Chinese)